

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

(повна назва інституту/факультету)

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри

_____ **Анатолій ОРЛОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2020 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка
(код і назва)

на тему: «Оптичні рідкокристалічні сенсори» _____

Виконав: студент __4__ курсу, групи _____ ДП-62
(шифр групи)

Воробйов Владислав Євгенійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник доц., к.ф.-м.н., доц. Родіонов М.К.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю

доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

Георгій СВЄЧНИКОВ

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без відпо-
відних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

Завдання на дипломну роботу

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ Факультет електроніки _____

(повна назва)

Кафедра _____ мікроелектроніки _____

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) _____ 153 мікро- та наносистемна техніка _____

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Анатолій ОРЛОВ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ на дипломний проект (роботу) студенту

Воробйов Владислав Євгенійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оптичний рідкокристалічний сенсор» _____

керівник роботи Родіонов М.К. доц., к.ф.-м.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 12.06.2020 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) Розглянути рідкий кристальний сенсор градиенту тиску, його фізичне представлення і основні характеристики. Провести аналіз шляхів оптимізації технічних параметрів датчиків рідкокристалічного градієнта тиску. Аналіз рідких кристальних сенсорів акселерації, вібрацій і включення.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 23 рисунка, 3 таблиці

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника
1	Пошук та ознайомлення з літературними джерелами за темою роботи.	01.03.2020	
2	Ознайомлення з основними характеристиками сесорів.	25.03.2020	
3	Аналіз шляхів оптимізації технічних параметрів датчиків рідкокристалічного градієнта тиску.	15.04.2020	
4	Аналіз рідких кристальних сенсорів акселерації, вібрацій і включення.	20.05.2020	
5	Оформлення звіту, формулювання висновків, перевірка, захист.	06.06.2020	

Студент

_____ (підпис)

Воробйов В.Є.

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Родіонов М. К.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена питанням підвищення ефективності одного з основних виконавчих елементів електроніки. Ознайомлення з основними характеристиками сесорів. Аналіз шляхів оптимізації технічних параметрів датчиків рідкокристалічного градієнта тиску. Аналіз рідких кристальних сенсорів акселерації, вібрацій і включення.

У роботі розглянуто башато типів сенсорів та віддано перевагу оптичному рідкокристалічному сесору в зв'язку з легкою уніфікацією його конструкції та широким використанням в побуті. Використовуючи властивості рідкокристалічних матеріалів вдалося досягти надзвичайно чутливих та прецизійних сенсорів.

Ключові слова: сесор, оптичний, рідкокристалічний, параметри сенсорів, датчики рідкокристалічного типу, шляхи оптимізації, чутливість нематичних шарів, стабілізуючі електричні поля, нематичний шар.

ABSTRACT

This thesis is devoted to improving the efficiency of one of the main executive elements of electronics. Introduction to the main characteristics of sensors. Analysis of ways to optimize the technical parameters of liquid crystal pressure gradient sensors. Analysis of liquid crystal sensors of acceleration, vibration and inclination.

The paper considers many types of sensors and prefers the optical liquid crystal sensor due to the easy unification of its construction and widespread use in the home. Using the properties of liquid crystal materials, it was possible to achieve extremely sensitive sensing sensors.

Keywords: sensor, optical, liquid crystal, sensor parameters, liquid crystal type sensors, optimization paths, sensitivity of nematic layers, stabilizing electric fields, nematic layer.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1.....	10
1.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДАТЧИКИ.....	10
1.2 ВИБІР ДАТЧИКІВ.....	28
1.3 ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ.....	32
1.4 ЧУТЛИВИЙ ДО ПОЛОЖЕННЯ ДІОД.....	36
1.5 РК СЕНСОР.....	40
1.6 МОЛЕКУЛЯРНА СТРУКТУРА ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД КЛІТИНИ РК.....	43
РОЗДІЛ 2.....	47
2.1 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА.....	47
2.2 ЧУТЛИВІСТЬ.....	48
2.3 НЕЛІНІЙНІСТЬ ТА ГІСТЕРЕЗИС.....	49
2.4 РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ.....	50
2.5 ТОЧНІСТЬ.....	51
2.6 ЗСУВ ТА НУЛЬОВИЙ ДРЕЙФ.....	51
2.7 ШУМ.....	52
2.8 ЧАС ВІДГУКУ.....	53
2.9 ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА СМУГА ПРОПУСКАННЯ.....	53
2.10 УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	53
2.11 МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ПОМИЛОК ДАТЧИКА	55

РОЗДІЛ 3.....	58
3.1 РІДКИЙ КРИСТАЛЬНИЙ СЕНЗОР ГРАДИЕНТУ ТИСКУ: ФІЗИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ І ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	58
3.2 ШЛЯХИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДАТЧИКІВ РІДКОКРИСТАЛІЧНОГО ГРАДІЄНТА ТИСКУ.....	64
3.3 РІДКІ КРИСТАЛЬНІ СЕНЗОРИ АКСЕЛЕРАЦІЇ, ВІБРАЦІЙ І ВКЛЮЧЕННЯ.....	68
ВИСНОВОК.....	73
ЛІТЕРАТУРА.....	74

ВСТУП

Представлені фізичні основи для високочутливих оптичних датчиків механічних збурень на основі явищ потоку в рідких кристалах. Показано, що лінійні відхилення оптичної осі нематичного рідкого кристала, викликані градієнтом тиску від початкової гомеотропної орієнтації, які реєструються за допомогою поляризованого світла, можна вважати основним механооптичним ефектом для застосування датчиків. Обговорюються шляхи оптимізації технічних характеристик рідкокристалічних датчиків, включаючи використання електричних полів. Розглянуті приклади датчиків прискорення, вібрації та нахилу на основі одних і тих же принципів. Показано, що використання рідких кристалів забезпечує надзвичайно високу порогову чутливість та електричне управління основними технічними параметрами оптичних датчиків.

У сучасній промисловості застосовується багато оптичних датчиків тиску, напруги, потоку, вібрації тощо, заснованих на різних фізичних явищах [1,2]. В даний час розробка нових типів оптичних датчиків (наприклад, волоконно-оптичні датчики [3]) наражається на все більший інтерес. Нематичні рідкі кристали (NLC) можна вважати дуже перспективними матеріалами для застосування датчиків, оскільки вони виявляють дуже високу чутливість до дії потоків та електричних полів. У цій роботі ми опишемо фізичні передумови та конкретні технічні рішення, які дозволяють запропонувати рідкокристалічні датчики механічних сил, положення та руху на основі фізичних явищ у потоках рідких кристалів [4]. Такі пристрої повинні бути віднесені до оптичних датчиків, оскільки вони спочатку перетворюють механічний стимул в оптичну відповідь.

Принципова відмінність нематичних рідких кристалів від ізотропних рідин полягає у існуванні орієнтаційного порядку дальнього діапазону, описаного в одиничному векторі - директор n посилається на середній напрямок довгих молекулярних осей та параметр скалярного порядку S , що характеризує усереднене відхилення окремих молекул із середнього напрямку [5]. Оптичні властивос-

ті NLC відповідають одноосному середовищу з локальною оптичною віссю, паралельною n . Останній може бути стабілізований у відносно тонких шарах (1-300 мкм) шляхом належної обробки поверхні. Ряд добре розроблених методів такої обробки [6] дозволяють отримати задану початкову структуру шару НЖК. Зокрема, можна отримати зразки монодоменів з початковою конфігурацією гомеотропічного (n - нормальне для площини шару) або планарного (n - у площині шару). Неоднорідні структури шарів, такі як кручені або гомеопланарні, також можуть бути реалізовані за допомогою обробки поверхні. Застосування глобальних дисплеїв рідких кристалів впливало з можливості використання низької електричної напруги для зміни початкової орієнтації та оптичних властивостей шарів ЖК.

Описане нижче сенсорне застосування ґрунтується на основній властивості рідких кристалів - внутрішньому зв'язку між градієнтами швидкості, що виникають при потоках зсуву, та локальною орієнтацією оптичної осі [4,5,7]. У випадку з нематичними рідкими кристалами (NLC) ця властивість забезпечує дуже високу чутливість датчиків через нульові значення статичного пружного модуля статичного зсуву.

РОЗДІЛ 1

1.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДАТЧИКИ

Сьогодні в понятті «Сенсор» дуже багато неточностей але я можу виділити найпопулярніший термін:

Датчик, сенсор (від англ. Sensor) - термін систем управління, первинний перетворювач, елемент вимірювального, сигнального, регулюючого або керуючого пристрою системи, що перетворює контрольовану величину в зручний для використання сигнал.

Розрізняють сенсори прямої дії та сенсори складені.

Сенсори прямої дії перетворюють зовнішню дію в електричний сигнал, використовуючи для цього відповідні фізичні явища. Прикладом сенсорів прямої дії є терморезистор, датчик Холла та ін. Вони поділяються на два види: активні і пасивні.

Активні сенсори працюють без додаткової енергії, а пасивні на відмінну від активних—потребують зовнішню енергію, яку називають сигналом збудження. Під час формування вихідного сигналу пасивний сенсор діє на сигнал збудження. А під час зміни зовнішньої дії на виході активного сенсора завжди виникає електричний сигнал. Пасивні та активні сенсори також називають *параметричними* та *генераторними* відповідно. Параметричними називають такі сенсори в яких міняються характеристики через зміну зовнішньої дії. А генераторними в свою чергу: в яких в наслідок зовнішньої дії на виході з'являється різниця електричних потенціалів (вихідний сигнал).

Датчики можуть перебувати всередині об'єкту або на його поверхні, або ж взагалі не мати безпосереднього зв'язку з об'єктом. Такі датчики називають *безконтактними*. Обмін енергією між датчиком і об'єктом може здійснюватися за допомогою магнітного поля (безконтактний індуктивний давач наближення),

ультразвуковим сигналом (безконтактний ультразвуковий сигнал присутності) тощо.

Також є *абсолютні* та *відносні* датчики.

Абсолютний датчик вимірює величини сигналу незалежно від умов проведення вимірів і вимірюється в абсолютних величинах. Тоді як відносні датчики видають такий вихідний сигнал, який може трактуватися по-різному.

Яскравим прикладом абсолютного датчика є датчик з терморезисторним сенсором. Його електричний опір на пряму залежить від абсолютної температури за шкалою Кельвіна. А от прикладом відносного датчика є термопарою, тому що вихідний сигнал є функцією градієнта температури на провідниках термопари. Тому визначити конкретну температуру за вихідним сигналом датчика можна тільки відносно відомої базової точки відліку.

Є багато видів датчиків, таі як: термометри, витратоміри, барометри тощо. Історично склалося так, що датчики зв'язані з технікою вимірювання та вимірювальними приладами. Сам термін «датчик» закріпився як елемент узагальненої логічної концепції (рис.1).

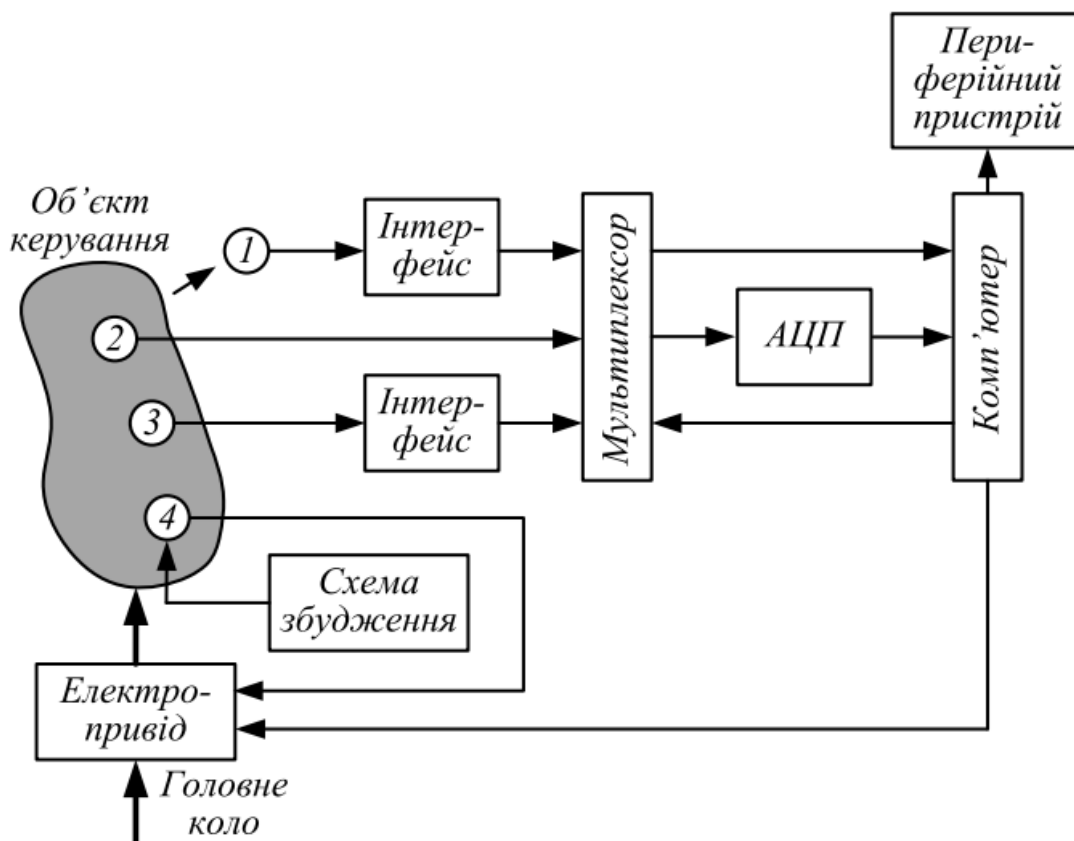


Рисунок 1.1 –Автоматизований керувальний комплекс, який показує роль датчиків у системі збору даних: 1 – безконтактний датчик; 2, 3 – активні датчик; 4 – пасивний датчик

Датчик перетворює вхідну величину в вихідний сигнал, більш зручний для подальшого руху інформації. У найпростіших випадках датчик здійснює тільки одне перетворення. Наприклад, температуру в ЕРС або переміщення - в зміна параметрів електричного кола. Однак в ряді випадків робиться не одне перетворення, а здійснюється функціональне перетворення $y = Z(Jx)$.

Датчики є найважливішим вузлом систем автоматики, так як їх неточність впливає на роботу системи в цілому. В реальних умовах датчики знаходяться в місцях з більш агресивним зовнішнім середовищем, ніж інші вузли систем автоматики, і їх практично неможливо захистити від впливу високих температур, вібрації, екстремальних моментів і сил, а також інших факторів. На роботу датчиків також можуть впливати різноманітні сигнали випадкового характеру, так

звані вимірювальні шуми. З огляду на вищенаведені обставини, до датчиків пред'являються такі, досить високі технічні вимоги:

- 1) залежність між величинами на вході і виході повинна бути однозначною, Г.Є. гистерезис характеристик повинен бути мінімальним або відсутнім;
- 2) висока селективність - вихід датчика повинен залежати тільки від вимірюваного входу, а не від сторонніх сигналів або вимірювальних шумів;
- 3) величина на виході повинна залежати від вхідної величини лінійно, тобто датчик повинен мати лінійну характеристику;
- 4) датчик повинен мати достатню чутливість і стабільні в часі характеристики. Чутливість s виражається як $s = dY / dX$, де dY , dX - збільшення вихідної величини датчика Y і вимірюваної величини X
- 5) сигнали датчика повинні діяти в напрямку від входу до виходу, вплив навантаження на роботу датчика має бути мінімальним або відсутнім;
- 6) датчик повинен мати високу швидкодію;
- 7) датчик повинен бути стійким до впливів зовнішнього середовища.

Електронні датчики можуть виявити все, від світла до відстані до прискорення. Датчики - це те, як виріб відчуває що-небудь у реальному світі, і існує майже нескінченна їх кількість.

Датчики вимірюють реальні величини, які потім перетворюються на електричний сигнал. Приводи, з іншого боку, приймають електричний сигнал і перетворюють його у фізичну форму. Наприклад, двигуни та динаміки - це два найбільш основних типи приводів.

Датчики іноді називають вхідними перетворювачами, а виконавчі пристрої - вихідними перетворювачами. Перетворювач - це дуже широкий термін, який відноситься до будь-якого пристрою, який перетворює між електричною величиною і величиною реального слова.

Існує така величезна різноманітність датчиків, що було б переконливо детально описати, як вони всі працюють. Замість цього, в цій статті я дам вам короткий огляд типів датчиків, найбільш часто використовуваних у виробництві споживчих товарів.

АНАЛОГОВИЙ ТА ЦИФРОВИЙ

Існує багато способів класифікації датчиків. Один з найбільш основних способів - аналоговий та цифровий. Різниця між аналоговими та цифровими датчиками стосується того, як датчик видає вимірювані дані. Це рідко має щось спільне із самим механізмом зондування (помітним винятком є кодові двигуни).

Наприклад, багато датчиків забезпечують напругу, яка пропорційно змінюється від вимірюваної кількості. Ця напруга є аналоговим сигналом, який постійно змінюється між двома порогами напруги.

Коли ця аналогова напруга подається в аналого-цифровий перетворювач (АЦП), вона буде перетворена в цифровий сигнал. Якщо цей АЦП вбудований у сам датчик, то цей датчик є цифровим.

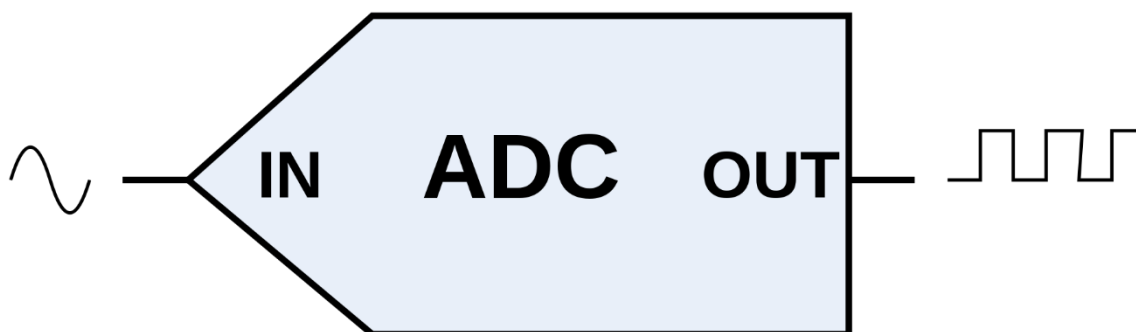


Рисунок 1.2 – Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) приймає аналоговий вхід і видає цифровий сигнал

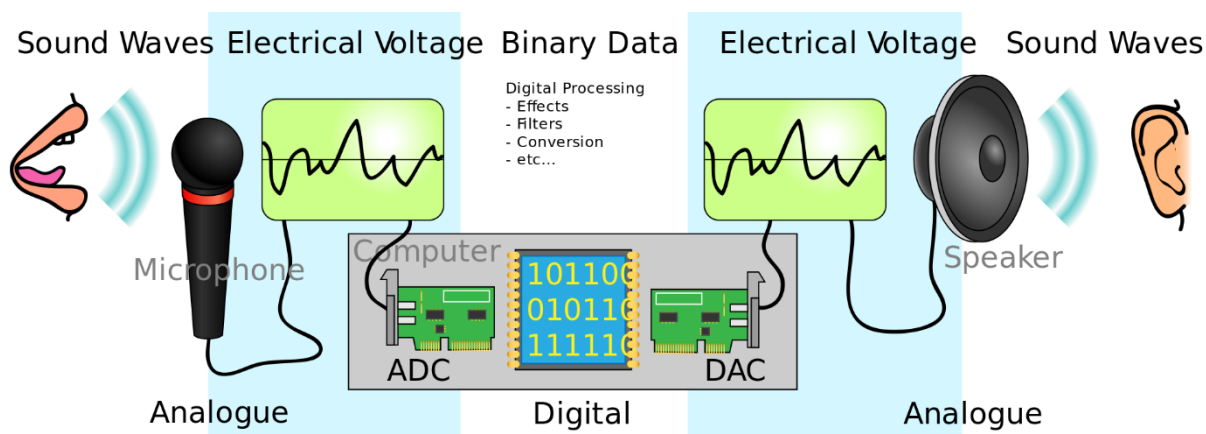


Рисунок 1.3 – Перетворення аудіоінформації в аналоговий електричний сигнал з подальшим перетворенням аналого-цифрового сигналу (АЦП). Аудіо обробляється цифровим способом, а згодом перетворюється назад в аналоговий цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) для приводу динаміка

Якщо замість цього АЦП знаходиться десь поза датчиком (як правило, всередині системного мікроконтролера або мікросхеми АЦП), датчик є аналоговим.

Цифрові датчики зазвичай є кращими, якщо їх ціна та технічні характеристики прийнятні. Це пояснюється тим, що цифрові датчики менш чутливі до електричних перешкод і мають менший проектний ризик.

ЗВУК

Одним з найбільш поширених типів датчиків є звукові датчики, більш відомі як мікрофони. Мікрофон перетворює коливання тиску повітря звукової хвилі в електричний сигнал.

Існує кілька різних способів здійснення цієї аудіо-електричної конверсії, але найпоширенішими типами мікрофонів є: динамічні мікрофони, конденсаторні мікрофони та п'єзоелектричні мікрофони.

Динамічний мікрофон використовує котушку, підвішену в магнітному полі. Конденсаторний мікрофон використовує вібраційну діафрагму як пластину конденсатора, а п'єзоелектричний мікрофон використовує кристал.

Одним з найпоширеніших типів конденсаторних мікрофонів є електретні мікрофони. Вони також є одним з найдешевших типів мікрофонів.

Мікрофони MEMS - це надзвичайно малі мікрофони, виготовлені на кремнієвій мікросхемі і зазвичай засновані на конструкції мікрофонного конденсатора. Багато мікрофони MEMS також вбудовують аналого-цифровий перетворювач (АЦП), забезпечуючи таким чином цифровий вихід.

ТЕМПЕРАТУРА

Датчики температури - це найбільш часто використовуваний тип датчика. Частково це пов'язано з тим, що так багато мікрочіпів включають прості вбудовані датчики температури, які закривають мікросхему, якщо вона почне перегріватися.

Три найпоширеніші типи датчиків вимірювання температури: термістори, RTD і термопари.

Термістор - це пристрій, виготовлений з оксиду металу, який зменшується в опір зі збільшенням температури. Через цей зворотний ефект термістори також називаються датчиком негативного температурного коефіцієнта (NTC).

Основна перевага термісторів - вони дешеві і прості у використанні. Критичним недоліком термісторів є те, що вони дуже нелінійні. Ця нелінійність обмежує діапазон температур, в якому їх можна точно використовувати.

Однак, якщо вам не потрібна надзвичайно висока точність або вимірювання вище сотень градусів, то термістори, ймовірно, найкращий вибір для вашого продукту.

Детектори температури опору (RTD) і термопари в основному використовуються в промислових областях, де точність і можливість вимірювання дуже високих температур є більш критичними. RTD - це найточніший датчик температури, але і найдорожчий.

Термопари в основному застосовуються в промислових областях вище 600 ° C.

ВОЛОГІСТЬ

Датчики вологості вимірюють відносну вологість. Вони поєднуються разом з датчиком температури, тому що для вимірювання відносної вологості ви повинні знати температуру.

Відносна вологість - це відсоток, який відноситься до того, скільки води утримує повітря порівняно з максимальною кількістю повітря, яку може утримувати повітря. Це вимірювання сили випаровування повітря.

Чим вище температура, тим більше може утримуватись водного повітря. Це означає, що температура має прямий вплив на вимірювання відносної вологості.

БАРОМЕТРИЧНИЙ ТИСК

Барометричні датчики тиску широко доступні. Оскільки барометричний тиск зменшується, коли ви піднімаєтесь у висоту, їх зазвичай використовують для вимірювання висоти.

З іншого боку, оскільки тиск збільшується в міру заглиблення під воду, барометричні датчики також можуть використовуватися для вимірювання глибини води. Нарешті, барометричні датчики тиску використовуються для пристроїв прогнозування погоди.

СИЛА / ВАГА

Найбільш поширений прилад для вимірювання сили або ваги називається деформатором. Тензодатчик - це в основному шматок металу, який згинається не-

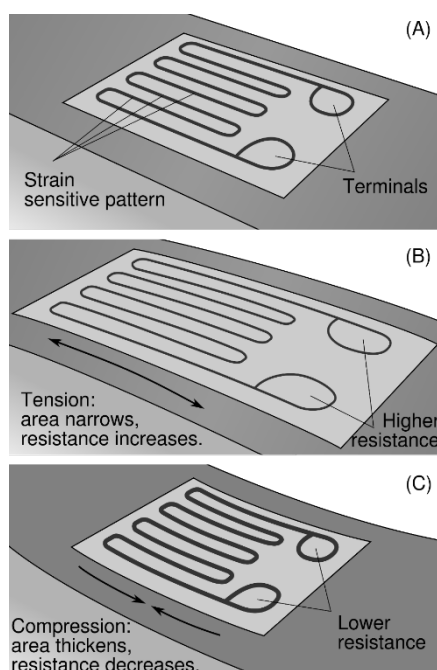


Рисунок 1.4 – Зображення, що показує, як працює тензодатчик

великою кількістю, коли до нього прикладається сила. Це згинання змінює опір металу, який потім може бути виміряний і перетворений у вагу.

Зміна опору для тензометричного датчика при зігнутому вкрай мала, тому тензодатчики утворюються в те, що називається мостом Пшеничного каменю. Мости пшеничного каменю - це дуже точні електричні ланцюги, які використовуються для вимірювання дуже малих змін опору.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Датчики струму, як правило, є внутрішнім датчиком, який використовується для вимірювання струму десь ще на одній платі. Звичайно, є винятки, як багатометровий вимірювач, який використовується для вимірювання струму.

Стандартним методом вимірювання струму є використання невеликого, сенсорного резистора. Струм, який ви бажаєте виміряти, проходить через цей резистор і створює падіння напруги через резистор, який можна виміряти. Цей перепад напруги потім може бути використаний для обчислення струму через резистор, використовуючи Закон Ома.

ГАЗИ

Є в наявності електронні датчики, які можуть вимірювати численні різні гази. Деякі з найпоширеніших датчиків газу призначені для виявлення чадного газу, вуглекислого газу та кисню. Але ви також можете знайти датчики для виявлення всього, від водню до вуглеводнів.

АКСЕЛЕРОМЕТР

Акселерометри вимірюють належне прискорення, яке є прискоренням по відношенню до вільного падіння. Наприклад, акселерометр у вільному падінні фактично вимірює нульове прискорення, тоді як стаціонарний акселерометр вимірює $9,8 \text{ м / с}^2$ за рахунок сили тяжіння Землі (визначеної як 1-г).

Одним з великих відкриттів Альберта Ейнштейна було те, що прискорення і сила тяжіння рівнозначні (звідси принцип еквівалентності назви).

Більшість акселерометрів вимірюють прискорення по трьох осях і можуть визначати орієнтацію по вертикальному напрямку тяжіння.

Визначаючи напрямок сили тяжіння Землі, можна визначити кут нахилу акселерометра за допомогою простої тригонометрії. Ось як смартфони визначають, чи тримаєте ви телефон у портретному або пейзажному режимі.

Акселерометр може вимірювати лише вертикальну орієнтацію по відношенню до сили тяжіння, але не виявляти бічну орієнтацію, наприклад вимірювану компасом.

Акселерометри також використовуються для виявлення вібрації, ударів, зміни напрямку чи орієнтації або при падінні пристрою.

ГІРОСКОП

Гіроскопи вимірюють кутову швидкість (швидкість обертання). Вони не вимірюють абсолютної орієнтації.

Як і акселерометри, гіроскопи зазвичай триосьові і вимірюють кутову швидкість вздовж трьох осей. Гіроскопи багато разів поєднуються разом з 3-вісним акселерометром, щоб утворити те, що відоме як 6-осевий блок інерційного вимірювання (IMU).

Спочатку ВМУ використовувались переважно у безпілотних літальних апаратах та супутниках. Зараз вони широко використовуються в споживчих електронних продуктах, таких як смартфони, фітнес-трекери, безпілотники та будь-який пристрій, який повинен виявити, як він рухається по космосу.

МАГНІТОМЕТР

Магнітометр - це по суті електронний компас, який вимірює бічну орієнтацію. Як випливає з назви, магнітометр вимірює силу і напрямок будь-якого магнітного поля, але він в основному використовується для вимірювання магнітного поля Землі так само, як і компас.

Триосьові магнітометри зазвичай поєднуються з 3-вісним акселерометром та 3-вісним гіроскопом для формування 9-осевого ІМУ.

ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ

ІНДУКТИВНИЙ / ЄМНИЙ

Ємнісні датчики використовують електричне поле для виявлення сусіднього об'єкта, тоді як індуктивні датчики використовують магнітне поле. Через цю різницю індуктивний датчик може виявляти лише металеві предмети, тоді як ємнісний датчик здатний виявляти як металеві, так і неметалеві предмети.

Як індуктивні, так і ємнісні датчики мають дуже обмежені відстані зондування приблизно до 60 мм.

УЛЬТРАЗВУКОВИЙ

Ультразвукові датчики працюють за допомогою звукових хвиль із частотою, значно вище діапазону слуху людини. Найбільш поширені програми для ультразвукових датчиків - це виявлення об'єктів та вимірювання відстані. При використанні для виявлення предметів під водою або для вимірювання глибини води ультразвуковий датчик називається сонаром.

На відміну від описаних раніше пасивних датчиків, ультразвуковий датчик справді є двонаправленим перетворювачем, що включає в себе і датчик (мікрофон), і привід (динамік).

Ультразвукові датчики містять ультразвуковий динамік, який розсилає ультразвукові звукові хвилі. Ці хвилі поширюються з динаміка, поки не потрапляють на предмет. Потім вони відскакують назад до датчика.

Потім власне датчик виявляє ці повернуті звукові хвилі. Вимірюючи загальний час у дорозі цих звукових хвиль, порівняно легко підрахувати відстань від цього об'єкта, оскільки звукові хвилі рухаються із відомою швидкістю. Це називається ехолокацією і це той самий процес, який використовують кажани та дельфіни.

Споживчі ультразвукові датчики звичайно можуть виявляти предмети на відстані від декількох сантиметрів до 10 метрів.

HC-SR04 - це дуже поширений ультразвуковий модуль, який зазвичай використовується виробниками, але також підходить для отримання більш високих обсягів. Це простий, недорогий модуль, який включає як ультразвуковий датчик (мікрофон), так і привід (динамік). Він має діапазон від 2 см до 4 м.

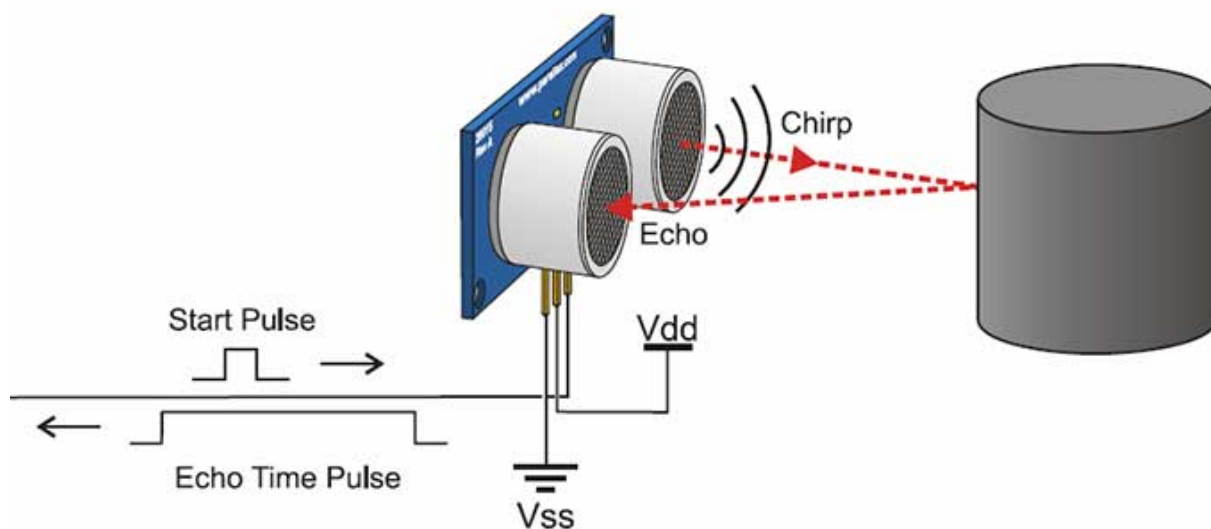


Рисунок 1.5 – Зображуюче зображення ехолокації за допомогою ультразвукового модуля HC-SR04

ДАТЧИКИ СВІТЛА

Світлові датчики - надзвичайно широка класифікація сенсорів, яка охоплює величезну кількість застосувань. Одне з найпростіших застосувань датчика світла - виявлення рівнів освітленості. Наприклад, зовнішні світильники, які автоматично включаються в сутінках, використовують датчик світла.

Напівпровідникові фотодіоди та фототранзистори - це два найпоширеніші типи світлових датчиків. Коли фотони світла вражають пристрій, вони генерують електрони, які виробляють електричний струм. Цей струм можна легко виміряти і перетворити на вимірювання зовнішнього світла.

Інше поширене застосування світлового датчика, без відповідного випромінювача світла, відоме як пасивне інфрачервоне (PIR) зондування. Їх називають пасивними, оскільки вони не випромінюють інфрачервону систему, вони лише виявляють її.

Датчик PIR вимірює інфрачервоне світло, що випромінює від теплих предметів у своєму полі зору. Будь-який об'єкт вище абсолютного нуля (-273°C) випромінює електромагнітне випромінювання (як правило, інфрачервоне), яке може бути виявлено датчиком світла.

PIR-датчики найчастіше використовуються для виявлення руху людей, тварин або предметів. Системи зовнішнього освітлення та охоронної сигналізації з активованим рухом використовують датчики PIR

Більшість датчиків PIR поєднані зі спеціальним типом оптичної лінзи, що називається лінзою Френеля. Ця лінза розбиває поле зору датчиків на сегменти, щоб датчик міг визначати невеликі кроки руху.

Багато справді крутих можливостей світлових датчиків світяться (каламбур не призначений) у поєднанні зі світловим випромінювачем (приводом).

Найпростіший додаток - це виявлення, коли об'єкт проходить між передавачем і датчиком, тим самим розбиваючи світловий промінь. Зазвичай використовується інфрачервоне світло, яке не видно людському оці. Саме так більшість відкривачів дверей гаражів виявляє, чи щось перешкоджає закриттю дверей.



Рисунок 1.6 –Приклад PIR-датчика, що активується рухом, з лінзою Френеля

Комбінації передавача / датчика світла також використовуються як оптичні коди для вимірювання положення та швидкості двигуна. Шаблон отворів дозволяє просвічувати світло, коли мотор знаходиться в певних положеннях. Датчики світла з іншого боку детектують світло, що проходить через ці отвори, дозволяючи системі визначати оберতальне положення двигуна.

TIME-OF-FLIGHT / LIDAR

Раніше, якщо ви хотіли виміряти відстань до об'єкта, що знаходиться поруч, ультразвукові датчики були вашим єдиним варіантом. Ви згадаєте, що ультразвукові датчики вимірюють відстань, проводячи тимчасові звукові хвилі, відбиті від виявленого об'єкта.

Вимірювання відносно коротких відстаней світлом набагато складніше, через різницю між швидкістю світла та швидкістю звуку. Звук подорожує близько 750 миль на годину, тоді як світло рухається майже в мільйон разів швидше з неймовірними 186 000 милями в секунду!

Але тепер доступні спеціальні датчики світла, які називаються датчиками часу польоту, які дозволяють точно виміряти відстань, призначаючи час польоту світлового променя. Напівпровідники не стали досить швидкими, щоб зробити це можливим до 2000-х років

ST Microelectronics пропонує два дуже вражаючих, недорогих датчиків ToF. ST VL53L0X стверджує, що є найменшим у світі датчиком ToF, розміром трохи більше 2 мм x 4 мм x 1 мм. Їх модель VL53L1X з більш тривалим діапазоном - на частку міліметра більша за кожен розмір, але збільшує робочий діапазон від 2 метрів до 4 метрів.

LiDAR - це абревіатура для виявлення та діапазону світла, або комбінація слів light та radar. LiDAR використовує датчики ToF для складання 2D або 3D області. Наприклад, якщо ви встановите датчик ToF на обертовий двигун, ви зможете точно відобразити область на 360 градусів поблизу об'єктів. Навіть більш

складні системи можуть виконувати це сканування в 3 вимірах, слугуючи 3D-сканером.

Багато датчиків можуть претендувати на роль LiDAR, але насправді вони використовують світлодіодні випромінювачі з меншими витратами, тоді як справжні рішення LiDAR використовують лазери для генерування вузького променя, необхідного для точного застосування 2D / 3D-карти.

ДАТЧИКИ ЖЕСТУ



Рисунок 1.7 – Відеоігри та програми віртуальної реальності використовують розширене розпізнавання жестів

Ще одне використання датчиків світла - для виявлення жестів людини. Вдосконалені системи відеоігор використовують лазери, спеціалізовані камери та швидкі процесори для виявлення складних жестів, як биття в бейсбол.

Такі вдосконалені датчики жестів не підходять для більш простих програм виявлення жестів. Для простих датчиків жестів, які легко інтегруються з мікроконтролером, краще замість цього використовувати менш дорогі інфрачервоні світлодіодні випромінювачі.

Простий датчик жесту може мати два ІЧ-випромінювачі з датчиком посередині. Цей тип датчика може виявити, коли і в якому напрямку об'єкт проходить повз. Це дозволяє реалізовувати прості жести, як пальцем руки.

Датчик time-of-flight ST VL53L0X, про який я згадував вище, також може використовуватися для простого виявлення жестів.

Ви знайдете загальний огляд більшості типів датчиків, які зазвичай використовуються у споживчих електронних приладах (та деяких промислових програмах).

Тепер, коли ви знаєте, який тип датчиків реально доступний, ви можете дізнатися більше про конкретні датчики. Такі як Оптичні та ЖК датчики (сенсори).

1.2 ВИБІР ДАТЧИКІВ

Вибір належного датчика, звичайно, не є тривіальним завданням. Перш за все, завдання, яке має підтримуватися одним або кількома датчиками, потребує ретельного аналізу та перегляду всіх можливих стратегій. Потенційні датчики повинні бути точно визначені, включаючи умови навколишнього середовища та механічні та електричні обмеження. Якщо можуть бути знайдені комерційні датчики, які відповідають вимогам, рекомендується придбати. Особливу увагу слід приділити електроніці інтерфейсу (загальнодоступна у вигляді окремих блоків, але рідко є достатньою для нещодавно розроблених механічних систем). Якщо ринок не пропонує правильної сенсорної системи, таку систему можна зібрати з комерційних сенсорних компонентів та електроніки. Вибір датчика заснований на задоволенні вимог; однак ці вимоги часто невідомі точно або детально, зокрема, коли дизайнером системи та її користувачем є різні особи. Перше завдання проєктувальника - отримати якомога більше інформації про май-

бутні програми системи, усі можливі умови експлуатації, фактори навколишнього середовища та технічні характеристики стосовно якості, фізичних розмірів та витрат. Перелік вимог повинен бути вичерпним. Навіть коли не всі предмети є актуальними, вони повинні бути зазначені як такі. Це дозволить залишити більше місця для дизайнера і мінімізує ризик того, що доведеться починати все заново. Список повинен бути складений таким чином, що дає можливість однозначного порівняння з кінцевими характеристиками розробленої системи. Після того, як дизайнер має повне уявлення про майбутнє використання системи, може початися фаза концептуальної розробки. Перш ніж задуматися про датчики, слід спочатку врахувати принцип вимірювання. Для приладів кожного принципу вимірювання конструктор має безліч чутливих методів у його розпорядженні. Для реалізації конкретного сенсорного методу дизайнеру доводиться вибирати оптимальний компонент і тип датчика з великої колекції датчиків, запропонованих численними виробниками датчиків. Цей процес проектування пояснюється прикладом вимірювання лише однієї статичної кількості: кількості рідини в ємності (наприклад, дозатора напоїв). Перше питання, на яке потрібно відповісти, - в яких одиницях повинна бути виражена сума: об'єм чи маса? Це може вплинути на остаточний вибір датчика. На рисунку 8 схематично показані різні принципи вимірювання:

- А: резервуар розміщується на вазі для вимірювання його загальної ваги;
- Б: манометр на дні бака;
- С: правило вимірювання зверху вниз з електронним зчитуванням;
- Д: детектор рівня на дні, вимірювання висоти стовпчика;
- Е: детектор рівня з верху бака, вимірюючи висоту порожньої частини;
- ґ: (маса або об'єм) витратоміри на вході і на виході.

Очевидно, що для вимірювання кількості, що пов'язана з кількістю рідини у водоймі, можна знайти ще багато принципів.

На етапі задуму розробки слід враховувати якомога більше принципів, навіть нетрадиційних. Виходячи зі списку вимог, слід мати можливість знайти відпо-

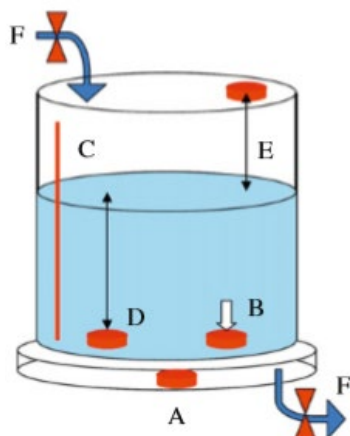


Рисунок 1.8 – Вимірювання вмісту резервуара

відний принцип кандидата із цього списку або принаймні видалити багато принципів на аргументованій основі. Наприклад, якщо резервуар містить корозійну рідину, переважний принцип безконтактного вимірювання, що ставить принципи В, С і D на нижнє місце у списку.

Крім того, для дуже великих цистерн метод А може бути усунений через високі витрати. Концептуальна конструкція закінчується набором принципів із плюсами і мінусами, класифікованими відповідно до перспектив успіху. Після визначення списку принципів кандидата, наступним кроком є пошук підходящого методу зондування для кожного з них. На прикладі рисунка 1.8 далі ми дослідимо принцип Е, рівень детектор, розміщений у верхній частині цистерни. Слід зазначити, що лише за рівнем не можна визначити кількість рідини: також слід враховувати форму ємності. Знову складається перелік різних можливих сенсорних методів таким чином:

Е1: поплавков, підключений до електронної системи зчитування;

Е2: оптичне вимірювання ToF;

Е3: оптичне вимірювання дальності;

Е4: вимірювання електромагнітного відстані (радари);

Е5: акустичне вимірювання ToF тощо.

Як і в концептуальній фазі, ці методи оцінюються, використовуючи перелік вимог, тому слід враховувати не тільки характеристики методу зондування, але й властивості об'єкта вимірювання (наприклад, вид рідини та форму резервуара) та навколишнє середовище рахунок. Для системи резервуарів акустичний метод ToF може стати відмінним кандидатом, оскільки його немає контактів. У цій фазі також важливо розглянути методи зниження таких факторів навколишнього середовища, як температура. Зрештою, ця фаза завершується переліком методів зондування кандидатів та їх достоїнств та недоліків щодо вимог.

Заключний крок - це вибір компонентів, що складають систему зондування. Тут має бути прийняте рішення між придбанням наявної у продажу системи та розробкою спеціальної системи. Основними критеріями є витрати та час: обидва часто недооцінюються при розгляді власного розвитку.

У цій фазі процесу відбору важливі характеристики датчиків стають важливими. Провайдери датчиків публікують технічні характеристики в таблицях даних або в Інтернеті. Однак доступність таких даних залишається поганою, що робить цю частину процесу відбору критичною та трудомісткою, зокрема для неспеціалістів у датчиковій галузі.

Очевидно, що приклад датчика рівня дуже спрощений, тоді як процес вибору зазвичай не такий простий. Оскільки датчик часто є лише одним елементом у розробці складної мехатронної системи, рекомендується тісна і часта взаємодія з іншими дисциплінами дизайну, а також із замовником.

1.3 ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ

Більшість систем зондування та силового зондування, що працюють на оптичних принципах, складаються з трьох основних частин: джерела світла, датчика світла та передавального середовища. Часто потрібні допоміжні засоби, наприклад, лінзи, оптичні хвилеводи, дзеркала, фільтри, поляризатори, діафрагми та подрібнювачі. Оптичний датчик переміщення побудований таким чином, що зміна відстані між двома частинами датчика або між однією частиною датчика та рухомим об'єктом призводить до зміни передачі, відбиття, поглинання, розсіювання або дифракції пучка світла. Більшість датчиків оптичного переміщення базуються на змінному відбитті (безперервному) або передачі (зазвичай увімкнено). Інші способи не часто зустрічаються в мехатроніці. Датчики оптичної сили або походять від датчиків переміщення шляхом додавання одного або декількох пружинних елементів, або базуються на зміні параметрів відповідних оптичних матеріалів (зокрема волокон). Оскільки світло є хвилею, можна також скористатися часом руху (або ToF), зсувом фази та перешкодами. Оптичні волокна завойовують все більший інтерес як датчики, поруч із їхньою роллю як засобу транспортування даних. Властивості передачі таких волокон можна модулювати різними фізичними властивостями, наприклад, температурою, вологістю, вигином, деформацією та концентрацією хімічних речовин, що контактують з волокном.

Термін оптичний датчик може означати дві різні речі:

- Існують датчики світла, по суті чутливі властивості, такі як оптична потужність або інтенсивність.
- Інші пристрої сприймають неоптичні властивості, такі як сили, переміщення та нахили, деформаційні, температурні, хімічні чи електричні властивості та якимось використовують світло для цієї мети.

Оптичні датчики - електронні пристрої, здатні під впливом електромагнітного випромінювання у видимому, інфрачервоному й ультрафіолетовому діапазонах подавати одиничний або сукупність сигналів на вхід реєструє або керуючої системи. Оптичні датчики реагують на непрозорі і напівпрозорі предмети, водяна пара, дим, аерозолі.

Найбільш поширеними оптичними датчиками та їх загальними характеристиками є:

- Фоторезистор: Маленький; дешевий; чутливий до видимого та ІЧ-світла; відсутність спрямованої чутливості; повільний (великий час відгуку).
- Фотодіод: малий; дешевий; чутливий до видимого та ІЧ-світла; помірна спрямована чутливість; швидкий час відгуку; також випускається як детектор квадранта (чотири діоди в одному корпусі).
- Фототранзистор: схожий на фотодіод, дещо повільніше.
- Діодний масив: масив фотодіодів: від декількох (в одному корпусі) до понад 4000 елементів (на мікросхемі); частотна лінія до 100 кГц; сірий тон і колір.
- Діод, чутливий до положення (PSD): Радіометричні властивості як фотодіод; 1D та 2D чутливі до положення.
- CCD-камера (сканування області): роздільна здатність до 2048×2048 елементів; частота кадрів до 1000 / с для типів низької роздільної здатності; сірий тон і колір.
- CMOS-камера (сканування області): Більш висока роздільна здатність порівняно з CCD-камерою; дещо гірші показники шуму.

Камери для сканування ліній і областей - чудові пристрої для виконання завдань із зображення, а тому відіграють важливу роль у мехатроніці та, зокрема, робототехніці. На ринку пропонується поступово збільшується кількість камер із вбудованою попередньою обробкою зображень. Розмір пікселів як для лінійних, так і для скануючих камер складає 5×5 мкм. Поточне дослідження має на меті збільшити роздільну здатність (кількість пікселів) та швидкість (вимірю-

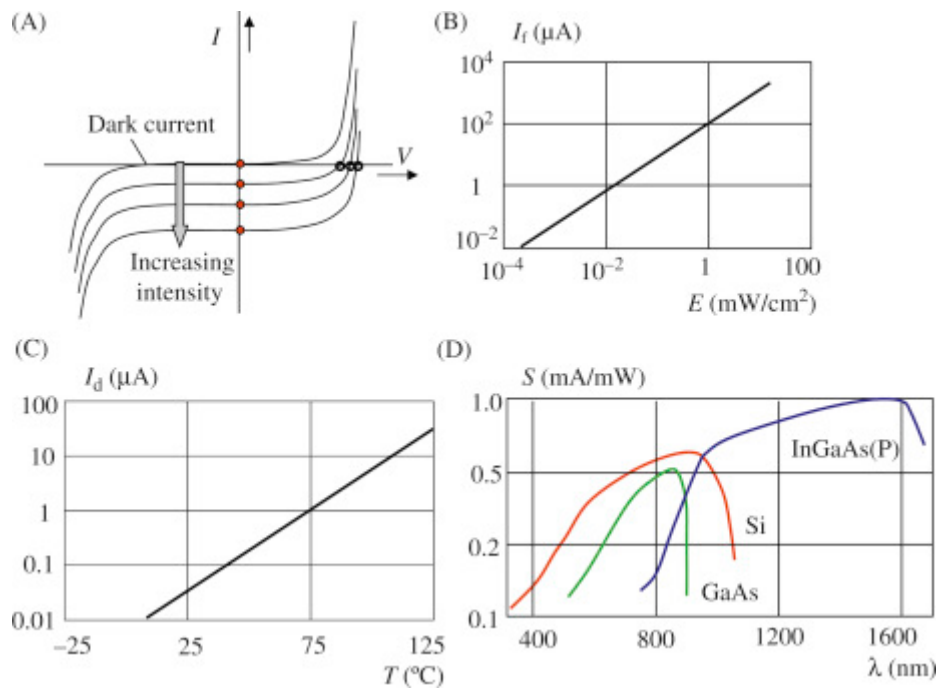


Рисунок 1.9 – Типові характеристики фотодіодів: (A) характеристика струму - напруги, (B) характеристика чутливості для фотодіоду кремнію, (C) темний струм проти температури та (D) спектральна чутливість діода Si, GaAs та InGaAsP

ється у часі набору пікселів чи частоті кадрів). Чіпи з розміром понад 60 мільйонів пікселів є здійсненими. Камери CMOS мають більш високу роздільну здатність, оскільки на мікросхемі немає буферів зарядки, як у CCD. Крім того, синхронізовані годинники камери та системи, що виключає необхідність захоплення кадру і тим самим збільшує загальну частоту кадрів. Камери не будуть обговорюватися далі у цій книзі: читач посилається на підручники з цього приводу та інформацію, надану виробниками.

На рис. 1.9. А – D показані типові характеристики фотодіодів: характеристики напруги та струму, характеристики чутливості та температури, спектральна чутливість. Спрямована чутливість задається аналогічно, як у випромінювачів; половина кутів коливається від 10 до 60 градусів, залежно від наявності вбудованої лінзи.

Характеристика напруги - струм: рис. 1.9 А зображує чотири криві для різних значень інтенсивності падаючого світла. За відсутності світла співвідношення напруга-струм (найвища крива) таке ж, як і для звичайного pn-діода: експоненціально зростаючий струм при прямому напрузі та малий струм витоку (темний струм) при зворотному зміщенні. Коли світло падає на pn-перехід, струм витоку збільшується, оскільки фотони генерують додаткові пари електрон-дірка, що може призвести до зовнішнього струму. Як видно на рис. 1.9 А, струм короткого замикання (представлений кулями на осі I) збільшується пропорційно падаючому світлу. Відкрита напруга (представлена колами на осі V) також збільшується при опроміненні, але нелінійним способом.

Характеристика чутливості: Фотострум пропорційний падаючому світлу протягом більше шести десятиліть (рис. 1.9Б). Це основна причина, чому поточний режим (або режим електропровідності) є кращим перед фотоелектричним режимом роботи. Поточне зчитування легко здійснити за допомогою операційного підсилювача в розташуванні перетворювача струму на напругу. Зазвичай подається зворотна напруга для того, щоб діод завжди працював у плоскій частині характеристик на рис. 1.9А.

Темний струм: не тільки світло (оптична енергія), але і теплова енергія породжують генерацію додаткових носіїв заряду навколо pn-переходу. Саме тому зворотний струм pn-діода не дорівнює нулю. Приблизно термічний витік струму витоку подвоюється кожні 7°C . При кімнатній температурі струм витоку кремнієвого діода дуже малий, приблизно 10 пА, але оскільки фотодіод має по

суті більшу активну площу, його темний струм також значно більший, і, крім того, він збільшується експоненціально з температурою (рис. 1.9С).

Спектральна чутливість: Припускаючи квантову ефективність 100%, кожен падаючий фотон створює одну електронно-діркову пару, якщо енергія фотона більша, ніж енергія смуги E_g (для генерування вільного електрона):

$$E_g = h \cdot \nu \quad (1.1)$$

,де ν частота, а h - константа Планка.

Так E_g матеріалу визначає максимальну довжину хвилі. Кремній має ширину забороненої зони, яка дорівнює 1,12 еВ, що відповідає граничній довжині хвилі близько 1100 нм. Нижня межа спектру встановлюється поглинанням світла до того, як воно досягне рп-переходу. Взагалі коефіцієнт поглинання залучених матеріалів зростає зі зменшеною довжиною хвилі. В результаті виходить спектральна смуга, яка сильно залежить від матеріалів. Рис. 9D дає спектральну чутливість трьох фотодіодів: Si, GaAs (обидва чутливі у видимій частині спектру) та спеціальний діод для великих довжин хвиль. Детальну інформацію про характеристики пристрою та продуктивність інших типів можна знайти в книгах виробників.

1.4 ЧУТЛИВИЙ ДО ПОЛОЖЕННЯ ДІОД

PSD - це світлочутливий діод, який не тільки чутливий до інтенсивності падаючого світла, але й до положення, коли вхідний промінь світла потрапляє на поверхню діода. На рисунку 12 схематично показано конфігурацію бічної кремнієвої PSD.

Пристрій складається з подовженого діода рп-фото з двома з'єднаннями на кінцях і одним загальним з'єднанням на підкладці. Світловий промінь, що падає, може проникати через верхній шар, аж до виснаженої області навколо рпjunction, де він генерує пари електронних дірок. Як і в звичайному фотодіоді, з'єднання стоїть вперед. Через електричне поле через перехід електрони приво-

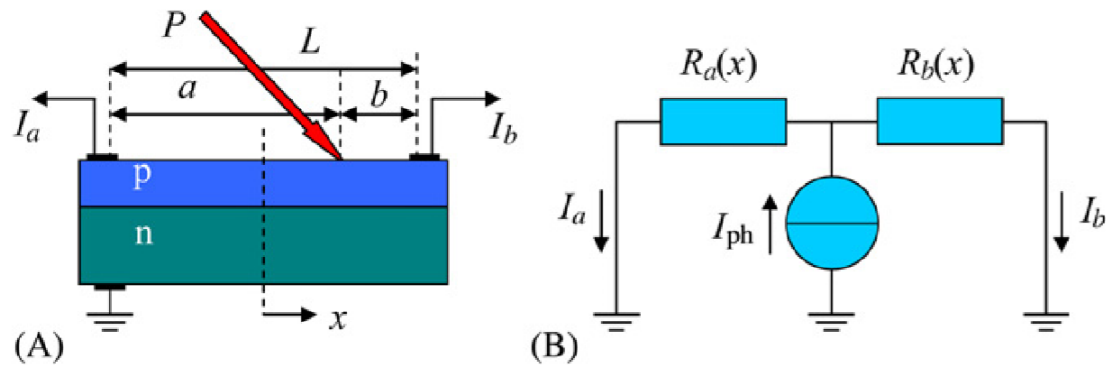


Рисунок 1.10 – PSD: (A) принцип роботи та (B) ділення струму

дяться в позитивну сторону, отвори переміщуються в негативну сторону стику. Електрони, що надходять у n-область, протікають через загальний контакт із землею; отвори в р-шарі розбиваються між двома верхніми контактами, виробляючи два зовнішніх фотоструми I_a та I_b .

На малюнку 1.10B показана електрична модель PSD. Він використовується для пояснення того, як струм поділу залежить від положення світлового променя. Світловий струм (моделюється як джерело струму I_{ph}) бере початок з того місця, де промінь потрапляє на діод. Поділ на два контакти визначається опорами від цієї точки до двох кінцевих точок (R_a і R_b). Застосування поточного закону Кірхгофа для двох вихідних струмів:

$$I_a = \frac{R_b}{R_a + R_b} I_{ph}$$

$$I_b = \frac{R_a}{R_a + R_b} I_{ph}$$

(1.2)

Припускаючи однорідний опір по всій довжині PSD, рівняння. (1.2) можна переписати як:

$$I_a = \frac{b}{a+b} I_{ph}$$

$$I_b = \frac{a}{a+b} I_{ph}$$

(1.3)

Як правило, походження координатної системи ПСД вибирається в його центрі. Таким чином, x - положення світлового променя відносно центру ($x=0$). Далі, коли загальна довжина PSD дорівнює L , відстань a на рисунку 1.10А дорівнює $L/2+x$, а b дорівнює $L-a$, так

$$I_a = \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{L} \right) I_{ph}$$

$$I_b = \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{L} \right) I_{ph}$$

(1.4)

Мабуть, різниця між двома вихідними струмами I_a-I_b дорівнює $-2xI_{ph}/L$ і лінійно залежить від x та I_{ph} . Однак бажано мати вихідний сигнал, який залежить тільки від положення x , а не від інтенсивності світла падаючого променя. Для отримання такого виходу I_a-I_b ділиться на $I_a+I_b=I_{ph}$, в результаті чого

$$\frac{I_a - I_b}{I_a + I_b} = \frac{2x}{L}$$

(1.5)

Таким чином, щоб здійснити незалежне вимірювання інтенсивності, PSD слід підключити до електронного інтерфейсу для трьох сигнальних операцій: додавання, віднімання та ділення. PSD по суті є аналоговим пристроєм: струми фото змінюються аналогічно положенню падаючого світлового променя. Це одна з причин, чому дослідники розробили PSD з вбудованою (аналоговою) обробкою сигналу для досягнення незалежних від інтенсивності вихідних сигналів відповідно до рівняння. [7,8].

За допомогою PSD на рисунку 1.10А положення світлового променя можна визначити лише в одному напрямку. Для 2D вимірювання необхідний 2D-PSD: цей тип PSD має чутливу поверхню квадратної форми та дві пари струмових контактів, по одній парі в кожному напрямку. Принцип його роботи точно такий же, як і для 1D-PSD.

Лінійність PSD багато в чому залежить від однорідності опору у верхньому шарі. У центральній частині (приблизно 70% від загальної довжини чи площі) лінійність краща на 1%, тоді як по краях похибка лінійності значно зростає: це слід враховувати під час роботи пристрою в цій області.

Діапазон лінійного ПСД майже дорівнює його довжині: від декількох мм до 10 см; ширина - кілька мм. 2D-PSD розміром від 131 до 434 див. Загальний опір між двома протилежними контактами становить кілька кОм. Пристрої більшого розміру в кремнію важко реалізувати. Інші матеріали досліджуються для збільшення бічних розмірів. Наприклад, PSD, виготовлені з гідрогенізованого аморфного кремнію (a-Si: H), були реалізовані з діапазоном 10310 см та порівнянною чутливістю [9]. Тривають дослідження з метою подальшого покращення детективності ПСД та зменшення впливу фонового світла [10].

Більшість PSD виготовлені з кремнію, отже, їх спектральна чутливість порівнянна зі звичайними кремнієвими фотодіодами: більшість світлодіодів та лазерних діодів добре співпадають у цьому відношенні з PSD.

PSD відповідає на оптичний центр інтенсивності падаючого світла. Неоднорідне фонове світло спричиняє зсув цієї точки, що призводить до помилки вимірювання. Зауважимо, що однорідне фонове світло змінює масштабний коефіцієнт системи, як видно з рівняння. (1.5), де рівний внесок у струми скасовується в чисельнику, але додається в знаменнику. Більш поглиблений аналіз впливу джерел освітлення навколишнього середовища наведено у посиланнях. [24] для 2DPSD.

Взагалі є лише одна світлова пляма (від лазера), яку можна визначити. У разі безлічі світлих плям промені можна виділити за допомогою модульованого світла на різних носіях [12]. PSD можна використовувати для безконтактних вимірювань переміщень.

1.5 РК

Рідкі кристали (РК) отримали широке застосування в науці, техніці і побуті. Тільки за останній десятиріччя досліджено багато нових цікавих явищ з фізики рідких кристалів, накопичений багатий матеріал і написано кілька тисяч оригінальних робіт.

Зазвичай в молекулярних кристалах впорядковані як положення, так орієнтація молекул. Однак в деяких з них в певному температурному інтервалі існують фази з дещо меншою впорядкованістю. Зокрема, може залишатися впорядкованої орієнтації молекул, але відсутня кореляція їх розміщення в цьому випадку немає перешкод для взаємного переміщення молекул, тобто зникає міцність і модуль зсуву, але зберігається анізотропія. Такі фази називають рідкокристалічними або мезоморфними.

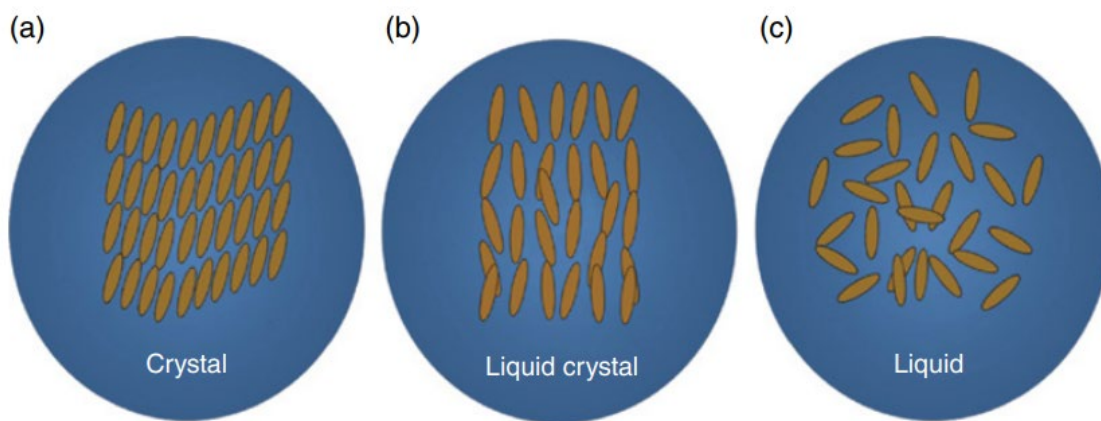


Рисунок 1.11 – Принципова схема будови (а) кристала, (б) рідкого кристала та (в) рідкого стану

Рідкі кристали (LC) - це матеріали з проміжною фазою між твердим і текучим станом. Молекули рідин, як показано на малюнку 1.11, є рухомими, не орієнтуючись або позиціонуючись

порядку, тоді як твердотільні молекули не мають рухливості з дальнім орієнтаційним та позиційним порядком. З іншого боку, молекули РК можуть бути орієнтовані як кристали з

здатністю текти рідким способом із поєднанням порядку і рухливості. Тому LC-фази називають проміжними фазами або мезофазами. Існують різні типи фаз РК

з різними оптичними властивостями, такими як термотропна, ліотропна та металотропна фази. Фазовий перехід термотропних РК у фазу РК залежить від температури. Крім того, термотропні РК перетворюються на звичайну рідку фазу при високій температурі з випадковим та ізотропним молекулярним порядком.

Однак фазовий перехід ізотропних РК залежить від температури та концентрації молекул РК в а розчинник. Як термотропні, так і ліотропні РК складаються з органічних молекул, тоді як металотропні РК мають молекули органіки та неорганіки. Отже, фазовий перехід РК металотропних РК є залежним від температури, концентрації та співвідношення неорганічно-органічного складу.

У цій главі вперше вводиться молекулярна структура та хімічний склад РК, їх класифікація та основні фізичні та оптичні властивості. Далі описані теоретичні методи лікування та отримання зразків РК клітин. Представлено застосування РК для електрооптики та застосувань, пов'язаних з дисплеєм, та нанесено нові розробки РК у фотоніці.

Матеріали і методика. Поряд іншими додатками рідкі кристали або датчики на їх основі (PCI). можна використовувати для модернізації лекційних демонстрацій, в тому числі, наприклад. реєстрації температурних змін, зміни концентрацій і складу газу і інших. Підібравши певний тип і склад сумішей рідких кристалів для потрібного температурного інтервалу отримують рідкокристалічний датчик за допомогою якого можна показати контрастну зміну кольору, відповідає нагріванню або охолодженню речовини, зміні складу або концентрації газу.

Удосконалені датчики вимагають як високої чутливості, так і широкої застосованості для різних типів навколишнього середовища та систем. Нещодавна зміна парадигми від звичайної жорсткої електроніки до гнучкої електроніки закликає сенсори бути надто тонкими та гнучкими, щоб правильно підходити до гнучких систем круглої форми . Що стосується тактильного зондування, то більшість звичайних датчиків покладаються або на ємнісні, або на резистивні сенсорні методи з використанням неорганічних матеріалів та / або металевих електродів у присутності полімерних плівок [5]. Однак цим датчикам потрібні прямі фізичні дотики для зондування, щоб вони не могли виявити опосередковану стимуляцію, таку як дуже слабкі зміни повітряного потоку, викликані наближенням до об'єктів. У зв'язку з цим ми ввели рідкі кристали (РК) як чутливий компонент через їх чудові колективні властивості (групову поведінку), що дозволяють ультрачутливі зондування [7]. Як частина передачі та посилення сигналу, щоб скористатися особливістю РК, використовувались транзистори органічного польового ефекту (OFET) через їх потенціал для надтонких та гнучких пристроїв. Поєднання LC та OFET породили абсолютно нові концептуа-

льні пристрої, пристрої, вбудовані в LC-OFET (LC-i-OFET), які можуть виконувати функцію тактильного датчика та багато інших ролей у майбутньому.

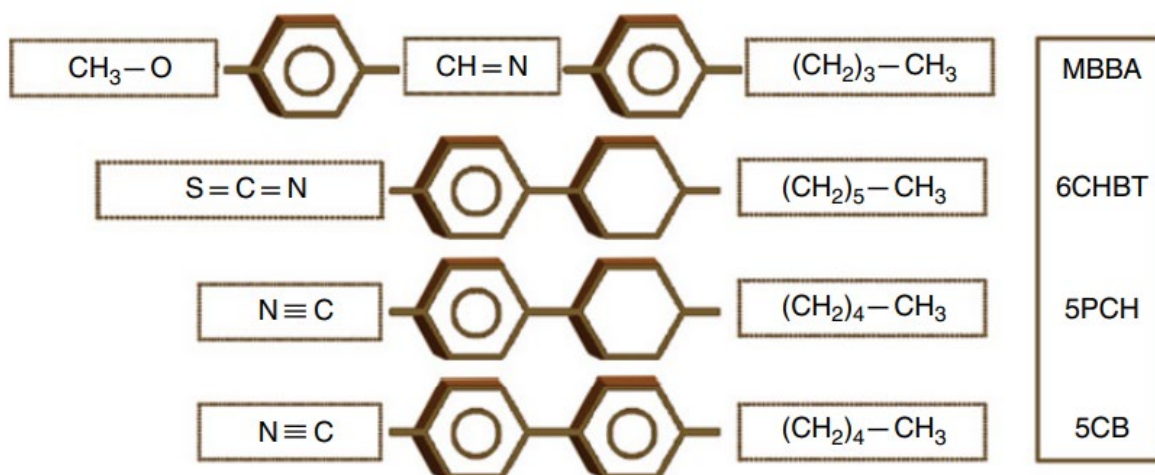
1.6 МОЛЕКУЛЯРНА СТРУКТУРА ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД КЛІТИНИ РК

Термотропні РК зазвичай утворюються з анізотропної форми молекули, такі як довгасті стрижні або диски. На малюнку 1.12 показана молекулярна структура типової молекули РК, подібної до стрижня. Він складається з двох або більше кільцевих систем, з'єднаних центральною групою зв'язків.



Рисунок 1.12 –Типова форма молекули РК

Кільця можуть забезпечувати молекулярні сили короткого дальності, необхідні для формування нематичної фази. Крім того, вони можуть впливати на електричні та пружні властивості матеріалу РК. Крім того, центральна зв'язувальна група має великий вплив на хімічну стійкість РК, включаючи їх стійкість до води або ультрафіолетового випромінювання. У зв'язку з цим найбільш стабільна LC-сполука має єдину зв'язок у центрі. Еластичні константи і температура переходу фаз РК в основному контролюються довгим бічним ланцюгом на одній стороні кілець. Однак діелектрична константа РК та її анізотропія визначаються кінцевою групою на іншому кінці кілець.



Малюнок 1.13 Приклади молекулярної структури матеріалів РК

На малюнку 1.13 показано кілька простих прикладів молекул з фазою LC. Ці приклади включають MBBA (4'-метоксибензилідієн-4-бутиланілін), 6CHBT (4-транс-н-гексил-циклогексил-ізотіоціанатобензол), 5PCH (4-(транс-4'-пентил-циклогексил), бензоніл-циклогексил) (4-пентил-4'-ціанобіфеніл). Крім того, існують складніші типи РК, такі як дископодібні або бананові форми, як показано на малюнку 1.14. Більш того, хіральні молекули без дзеркальної симетрії можуть бути організовані для отримання холестеричних фаз LC.

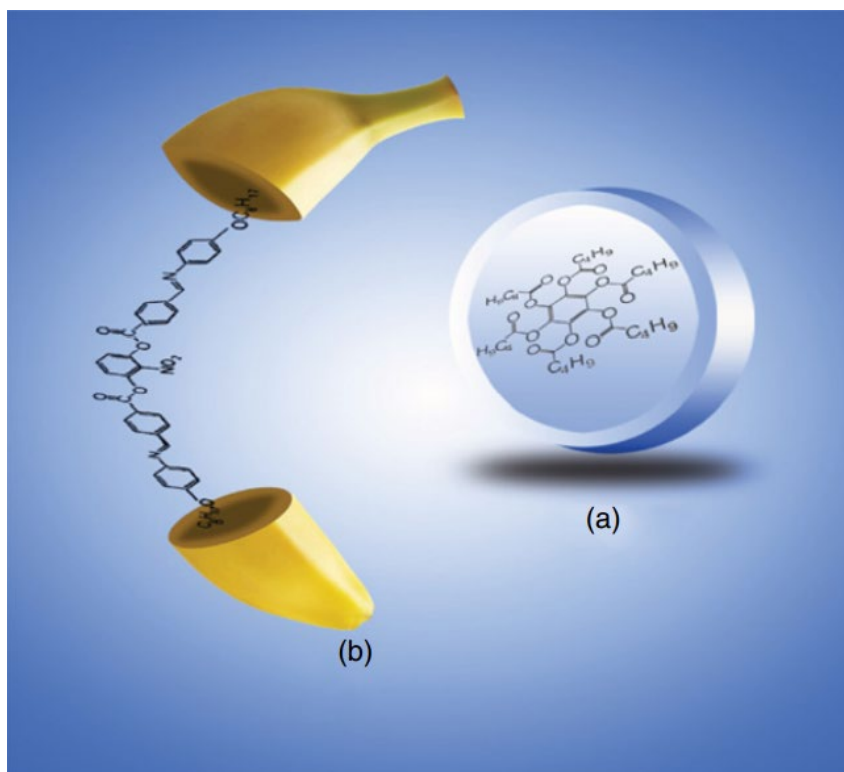


Рисунок 1.14 – Молекулярна структура похідних (а) бензолу-гекса п-алканоату та (b) РК у формі банана

КОРОТКІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

У цьому розділі було розглянуто поняття сенсор (датчик), його вибір та окремо поверхнево розглянули оптичні сенсори. Окремо розглянуто РК(рідкі кристали) та молекулярну структуру, та хімічний склад клітини РК. Використовуючи властивості рідких кристалів, які є дуже чутливі змінюють колір при зміні температури (склад або концентрації газу), можна наочно продемонструвати серед інших такі явища: Перетворення механічної енергії в теплову при ударі. Шматок металу (сталений брусок) закріплений на дерев'яній підставці. розміщують на масивній дерев'яній дошці і вдарає молотком по ньому. Нагрівання бруска при цьому демонструють зі зміною кольору дисплея. який нанесений на поверхню тонкої мшної пластини, що закріплена до бруска. Поряд іншими додатками рідкі кристали або датчики на їх основі (PCI). можна використовувати для модернізації лекційних демонстрацій, в тому числі, наприклад. реєстрації температурних змін, зміни концентрацій і складу газу і інших. Підібравши певний тип і склад сумішей рідких кристалів для потрібного температурного інтервалу отримують рідкокристалічний датчик за допомогою якого можна показати контрастну зміну кольору, відповідає нагріванню або охолодженню речовини, зміні складу або концентрації газу.

2 РОЗДІЛ

2.1 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА

Недосконалість датчика, як правило, перерахована в таблицях даних, наданих виробником. Ці характеристики датчиків інформують користувача про відхилення від ідеальної поведінки. Користувач повинен прийняти технічні недосконалості, якщо вони не перевищують задані значення. Будь-який вимірювальний прилад, а отже, і будь-який датчик, повинен бути повністю визначений щодо його продуктивності. На жаль, багато аркушів даних демонструють недостатню чіткість та повноту. Поступово встановлюються міжнародні угоди про офіційні описи помилок. Вичерпний опис помилок вимірювань та термінології помилок можна знайти в [3], поряд з міжнародним стандартом номенклатури та термінології перетворювачів [4]. Різні міжнародні комітети працюють над створенням єдиної структури для визначення сенсорів [5]. Нарешті, готується спеціальний документ, який містить визначення термінів, пов'язаних з вимірюванням: Міжнародна лексика основних та загальних термінів з метрології (короткий VIM) [6].

Характеристики, що описують продуктивність датчиків, можна класифікувати на чотири групи:

- Статичні характеристики, що характеризують результативність щодо дуже повільних змін.
- Динамічні характеристики, що визначають реакцію датчика на зміни часу та вимірюваної величини (кількість, яку необхідно виміряти).
- Екологічні характеристики, що стосуються працездатності датчика після або під час впливу визначених зовнішніх умов (наприклад, тиску, температури, вібрації та випромінювання).
- Характеристики надійності, що описують тривалість життя датчика.

Помилки, характерні для певних типів датчиків, обговорюються у відповідних главах. У цьому розділі ми спочатку визначимо деякі загальні характеристики:

- Чутливість
- Нелінійність та гістерезис
- Дозвіл
- Точність
- Зсув і нульовий дрейф
- Шум
- Час відповіді
- Частотна характеристика.

2.2 ЧУТЛИВІСТЬ

Чутливість датчика визначається як відношення між зміною вихідного значення та зміною вхідного значення, яке викликає зміну виходу. Математично чутливість виражається як $S=dy/dx$, де «х» - вхідний сигнал (вимірюваний), а «у» - вихід (електричний сигнал). Зазвичай датчик також чутливий до змін величин, відмінних від передбачуваної вхідної кількості, таких як температура навколишнього середовища або напруга живлення. Ці правильні чутливості також повинні бути визначені для правильної інтерпретації результатів вимірювань. Для кращого розуміння ефекту таких небажаних чутливості вони часто пов'язані з чутливістю самої величини вимірювання.

Приклад 1

- Чутливість конкретного датчика переміщення з виходом напруги визначається як 10 мВ / мм. Зазначена його чутливість до температури становить 0,1 мВ/К. Оскільки 0,1 мВ відповідає зміщенню 10 мкм, температурну чутливість також можна виразити як 10 мкм / К. Підвищення температури на 5 °С призводить до видимого зміщення 50 мкм.

Приклад 2

- Чутливість певного типу датчика температури становить 100 мВ / К, включаючи блок кондиціонування сигналу. Сама частина кондиціонування

сигналу також чутлива до (навколишньої) температури і, схоже, створює додаткову вихідну напругу 0,5 мВ для кожного підвищення температури навколишнього середовища за Цельсієм (не обов'язково температури датчика). Так, небажана температурна чутливість становить 0,5 мВ / К або 0,5 / 10055 мК / К. Зміна температури навколишнього середовища в $\pm 10^\circ\text{C}$ призводить до очевидної зміни температури датчика, що дорівнює ± 50 мК.

2.3 НЕЛІНІЙНІСТЬ ТА ГІСТЕРЕЗИС

Якщо вихід y є лінійною функцією входу x , чутливість S не залежить від x . У разі нелінійної функції передачі $y=f(x)$, S залежить від вхідного або вихідного значення. Часто лінійну відповідь надають перевагу для зменшення обчислювального навантаження, наприклад, у мультисенсорних системах управління. У цьому випадку чутливість може бути виражена одним параметром. Крім того, нелінійність вводить гармоніки частот вхідного сигналу, що може перешкоджати правильному аналізу частоти фізичних сигналів.

Передача датчика з невеликою нелінійністю може бути апроксимована прямою лінією, щоб визначити її чутливість лише на одне число. Користувача слід повідомити про відхилення від фактичної передачі; це визначається помилкою нелінійності. Похибка лінійності системи - це максимальне відхилення фактичної характеристики передачі від заданої прямої. Виробники визначають лінійність різними способами, наприклад, як відхилення вхідних або вихідних одиниць:

Δx_{\max} або Δy_{\max} , або як частка FS (full scale/повна шкала): $\Delta x_{\max}/x_{\max}$. Нелінійність завжди повинна надаватися разом із специфікацією прямої. Використовуються наступні визначення:

- Нелінійність терміналу: заснована на кінцевій лінії: пряма лінія між 0% і 100% теоретичними повномасштабними точками.

- Нелінійність кінцевої точки: на основі лінії кінцевої точки, прямої між каліброваними кінцевими точками діапазону; збігається з кінцевою (теоретичною) лінією після калібрування нуля та шкали.
- Незалежна нелінійність: посилення на найкраще підходить пряму лінію відповідно до визначеного критерію помилки, наприклад, лінію посередині між двома паралельними лініями, що охоплюють усі точки калібрування; якщо використовується критерій найменшого квадратичної помилки для найкращої прямої лінії, ця помилка лінійності є:
- Найменша квадратна нелінійність: на основі найменшої квадратної лінії, лінія, для якої підсумовані квадрати залишків мінімізовані.

Гістерезис - це максимальна різниця вихідного сигналу, коли вимірюваний спочатку збільшується в заданому діапазоні, а потім повертається до вихідного значення. Діапазон пройденого слід вказати, оскільки гістерезис сильно залежить від нього.

2.4 РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ

Роздільна здатність вказує на найменший приріст вхідної кількості. Коли вимірювана величина постійно змінюється, вихід датчика може показувати переривисті кроки. Значенням відповідної найменшої помітної зміни вхідної змінної є роздільна здатність: Δx_{\min} . Іноді цей параметр пов'язаний з максимальним значенням x_{\max} , яке можна обробити (повномасштабне значення), в результаті чого роздільна здатність виражається як $\Delta x_{\min}/x_{\max}$ або $x_{\max}/\Delta x_{\min}$. Таке змішане використання визначень здається заплутаним, хоча з одиниць або самого значення легко зрозуміти, яке визначення використовується.

Приклад 1

Роздільна здатність конкретного типу лінійного потенціометра, намотаного на дріт, діапазоном 10 см, задана як 1024; якщо припустити, що це повномасштабне значення, це означає, що вихід змінюється безперервно кроками, еквівалентними зміщенням входу 10 мкм.

Приклад 2

Окремий тип оптичного кодера має роздільну здатність 14 біт. Найменша зміна кута, яку можна виявити за допомогою цього кодера, становить $2\pi/2^{14} \approx 3,833 \times 10^{-4}$ рад або $0,022^\circ$.

2.5 ТОЧНІСТЬ

Формально точність відображає близькість згоди між фактичним результатом вимірювання та справжнім значенням вимірюваної величини. Специфікація точності повинна включати відповідні умови та інші величини. Багато виробників датчиків визначають продуктивність сенсора з точки зору точності. Цю специфікацію слід розглядати з підозрою, оскільки вона може включати або не містити особливих недосконалостей датчика (наприклад, нелінійність, гістерезис і дрейф) і може бути дійсною лише за жорстких умов. Точність не така, як точність. Власне, термін точність не слід застосовувати ні в якому разі, щоб уникнути плутанини.

2.6 ЗСУВ ТА НУЛЬОВИЙ ДРЕЙФ

Більшість датчиків розроблені таким чином, що на нульовому вході вихід дорівнює нулю. Якщо характеристика передачі не перетинає початок ($x, y=0,0$), система, як кажуть, зміщена. Зсув виражається у вигляді вхідної чи вихідної кількості. Визначення зсуву введення є кращим, щоб полегшити порівняння зі значенням вимірюваної величини

Приклад

Чутливість певного типу силового зондування становить $0,1 \text{ В} / \text{н}$. При нульовій силі висновок становить 3 мВ. Зсув (вхід) цієї системи - це зміщення виходу, поділене на чутливість, тому $0,03 \text{ Н}$.

Ненульовий зсув виникає в основному за допусків компонентів. Компенсація зміщення може бути виконана в електроніці інтерфейсу або блоці обробки сигналів. Після встановлення до нуля зсув може все-таки змінитися через зміни

температури, зміни напруги живлення або наслідки старіння. Ця відносно повільна зміна зміщення називається нульовим дрейфом. Зокрема, температурний дрейф (коефіцієнт температури або т. Зв. Зміщення) є важливим пунктом у списку специфікацій.

Іноді система навмисно розробляється зі зміщенням. Багато промислових перетворювачів мають вихідний струм від 4 до 20 мА. Це полегшує виявлення переломів кабелю або короткого замикання, створюючи нульовий вихід, чітко відрізняє від нульового входу.

2.7 ШУМ

Електричний шум - це сукупність спонтанних коливань струмів і напруг. Вони присутні в будь-якій електронній системі і виникають при тепловому русі електронів і з квантованої природи електричного заряду. Електричний шум також визначається з точки зору вхідної кількості, щоб показати його вплив відносно величини вимірюваної величини. Білий шум (шум з постійною потужністю в широкому діапазоні частот), як правило, виражається у вигляді спектральної потужності шуму ($\text{Вт} / \text{Гц}$), спектральної напруги шуму ($\text{В} / \sqrt{\text{Гц}}$) або спектрального шумового струму ($\text{А} / \sqrt{\text{Гц}}$). Тепловий шум - приклад "білого шуму".

Інший важливий тип шуму - $1/f$ шум (шум, що перевищує f), сукупність явищ шуму зі спектральною потужністю шуму, пропорційною f^{-n} , з $n=1-2$.

Шум квантування - результат квантування аналогового сигналу. Округлення призводить до (безперервного) відхилення від вихідного сигналу. Ця помилка може розглядатися як "сигнал" із нульовим середнім значенням та стандартним відхиленням, що визначається роздільною здатністю перетворювача AD.

2.8 ЧАС ВІДГУКУ

Час відгуку пов'язаний зі швидкістю зміни вихідного сигналу на зміна ступеневої вимірюваної величини. Специфікація часу відгуку потреби завжди повинен супроводжуватися вказівкою на етапі введення (наприклад, FS-full scale/ повної шкали) і діапазон вихідного сигналу, для якого визначається час відгуку, наприклад, 10-90%. Повзучість і коливання можуть зробити уточнення часу реакції безглуздим або принаймні оманливим.

2.9 ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА СМУГА ПРОПУСКАННЯ

Чутливість системи залежить від частоти або швидкості зміни вимірюваної величини. Мірилом корисного діапазону частот є смуга частот. Верхня та нижня межі смуги частот визначаються як ті частоти, для яких вихідний сигнал знизився до половини номінального значення при постійній вхідній потужності. Для величин напруги або струму критерій становить $\frac{1}{2} \sqrt{2}$ від номінального значення. Нижня межа смуги частот може дорівнювати нулю; верхня межа завжди має кінцеве значення. Обсяг смуги частот називається пропускнуою здатністю системи, вираженою в Гц.

2.10 УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Усі елементи специфікації застосовуються лише в межах робочого діапазону системи, що також слід правильно вказати. Він задається діапазоном вимірювань, необхідною напругою живлення, умовами навколишнього середовища та, можливо, іншими параметрами.

Усі елементи специфікації застосовуються лише в межах робочого діапазону системи, що також слід правильно вказати. Він задається діапазоном вимірювань, необхідною напругою живлення, умовами навколишнього середовища та, можливо, іншими параметрами.

Приклад 1

Частотні характеристики та шум поведінки акселерометра є важливими характеристиками. Таблиця 1 - уривок із таблиць даних акселерометра QA-2000 з аерокосмічного альянсу.

Приклад 2

Багато датчиків вологості мають нелінійну поведінку. Таблиця 2 - приклад характеристик датчика вологості EMD 2000 від Phys-Chem SCIENTIFIC Corp., NY; RH означає відносну вологість.

Таблиця 2.1

Екологічні:	Температура Шок Вібрація	255°C до 195°C 250 г, напівсинус, 6 мс MIL-E-5400 кривої IV (A)
Частотна характеристика:	0-10 Гц 10-300 Гц Вище 300 Гц Природна частота	0,01 дБ 0,45 дБ <5 дБ пікових >800 Гц
Шум:	0-10 Гц 10-500 Гц Від 500 Гц до 10 кГц	10 нА 100 нА 2 мкА

Таблиця 2.2

Робочий діапазон відносної вологості	10-98% RH
Діапазон робочих температур	Від -10°C до 75°C
Час реакції	10 с. для ступінчастої зміни від 11% RH до 93%, щоб досягти 90% або краще рівноважного значення
Гістерезис	±0,3% RH при 25°C

Незважаючи на вказані обмеження датчиків, сенсорна система може бути налаштована таким чином, що ефект деяких із цих обмежень буде усунутий або принаймні зменшений. У наступному розділі ми розглянемо різні можливості конструкцій із зменшенням помилок.

2.11 МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ПОМИЛОК ДАТЧИКА

Будь-яка сенсорна система має недоліки, вводючи помилки вимірювань. Ці помилки походять або від самої системи (наприклад, шум системи, квантування та дрейф) або є наслідком впливу навколишнього середовища, таких як теплові, електромагнітні та механічні перешкоди. Виробники датчиків намагаються мінімізувати такі внутрішні помилки за рахунок належного проектування макета датчика та інкапсуляції; решта недосконалостей повинні бути вказані в табли-

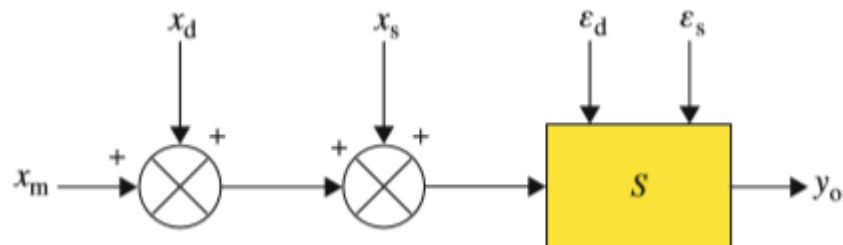


Рисунок 2.1 – Спрощена модель датчика, включаючи сигнали помилок

цях даних датчика. Користувач (наприклад, дизайнер мехатронних пристроїв) повинен мінімізувати додаткові помилки, які можуть виникнути внаслідок неправильного монтажу та несправного електронного взаємодії. У цьому розділі ми представляємо деякі загальні поняття щодо мінімізації або зменшення ефекту внутрішніх помилок при застосуванні датчиків.

Зазвичай датчик призначений для чутливості до лише однієї конкретної кількості, тим самим мінімізуючи чутливість до всіх інших величин, незважаючи на неминучу наявність багатьох фізичних впливів. Результат - датчик, який чутливий не тільки до вимірюваної кількості, але й у більшій чи меншій мірі до ін-

ших величин; це називається перехресною чутливістю пристрою. Температури бояться найбільше, що пояснюється висловом, що "кожен датчик є датчиком температури".

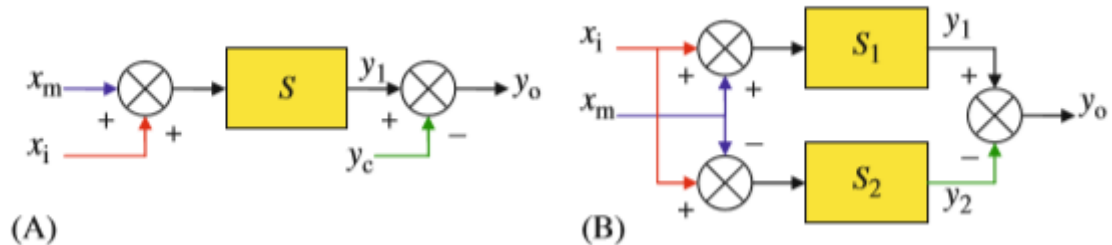


Рисунок 2.2 – Загальна схема компенсації: (А) компенсаційний сигнал; (В) збалансована конфігурація

Крім перехресної чутливості, сенсори можуть страждати і від багатьох інших недосконалостей. Вони впливають на передачу вимірювального сигналу і породжують небажані вихідні сигнали. На малюнку 2.1 показана спрощена модель сенсорної системи із зазначенням декількох джерел помилок. На цьому малюнку x_m - вимірювальний сигнал, а y_o - вихідний сигнал. Сигнали адитивної помилки моделюються як додаткові вхідні сигнали: x_d і x_s являють собою детерміновані та стохастичні сигнали помилок відповідно. Вони моделюють всілякі перешкоди з навколишнього середовища та еквівалентні сигнали помилок через зсув системи та шум. Вхідні помилки ε_d і ε_s являють собою мультиплікативні помилки: ці сигнали впливають на чутливість датчика. Для цієї спрощеної моделі вихідний сигнал датчика може записуватися відповідно:

$$y_o = S(1 + \varepsilon_d + \varepsilon_s)(x_m + x_d + x_s) \quad (2.1)$$

,де S - номінальна чутливість. Ця модель буде використовуватися для оцінки різних методів зменшення помилок. Деякі з цих методів знижуватимуть в основному аддитивні датчики; інші мінімізують мультиплікативні помилки. Поліп-

шення працездатності датчика можна отримати за допомогою вдосконаленої конструкції або просто через додаткову обробку сигналу. Ми обговоримо п'ять основних методів зменшення помилок:

1. Компенсація
2. Відгуки
3. Фільтрування
4. Модуляція
5. Корекція

Способи застосовуються не тільки до датчиків, але й до інших систем обробки сигналів як підсилювачів і систем передачі сигналу.

3 РОЗДІЛ

ВИКОРИСТАННЯ РІДКИХ КРИСТАЛІВ В ОПТИЧНИХ ДАТЧИКАХ МЕХАНІЧНИХ СИЛ І РУХУ

3.1 РІДКИЙ КРИСТАЛЬНИЙ СЕНЗОР ГРАДІЕНТУ ТИСКУ: ФІЗИЧНА ПРЕДСТАВЛЕННЯ І ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ми розглянемо рідкокристалічні датчики на основі механо-оптичних ефектів у потоці Пуазеля нематичних рідких кристалів (рис. 3.1). Такий потік виникає під дією градієнта тиску $G=(P_2-P_1)/L$, поданого вздовж каналу. При надзвичайно малих градієнтах тиску він відповідає потокам Пуазеля ізотропних рідин з профілем параболічної швидкості та постійною в'язкістю зсуву. Така поведінка ньютонів визначається стабілізацією дії поверхонь, що перешкоджає змінам початкової орієнтаційної структури шару РК(LS). При більш високих значеннях градієнта тиску початкова структура може бути спотворена через градієнт швидкості, що існує в потоках Пуазеля. Це призводить до різноманітних лінійних та нелінійних явищ у потоках рідких кристалів [4,8-14], зареєстрованих оптичними методами.

Результати, отримані до цього часу [11-14], показали, що початкова гомеотропна орієнтація демонструє найбільш високу чутливість до градієнта тиску порівняно з іншими типами первинної орієнтації. Більше того, орієнтаційні спотворення, викликані потоком, легко реєструються в цьому випадку, оскільки вони призводять до роздвоєння зразка. Отже, зміни оптичних параметрів, таких як

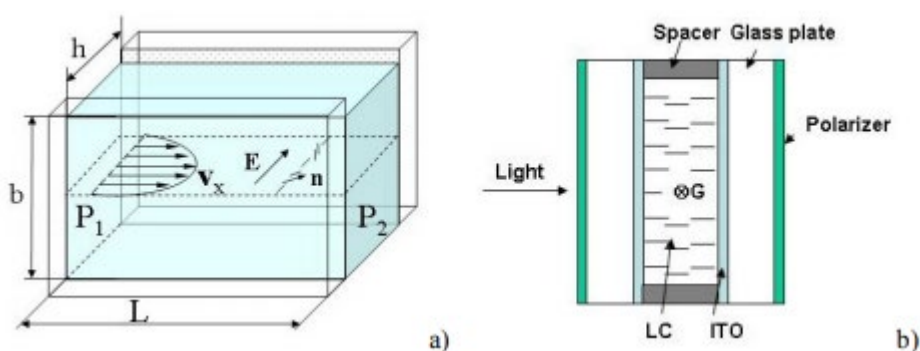


Рисунок 3.1 – Пуазейський потік нематичних рідких кристалів у прямокутному каналі (a) та побудова чутливого елемента (b)

затримка оптичної фази та інтенсивність поляризованого світла в лінійному режимі режисерського руху, представляють первинний інтерес для розробки високочутливих датчиків рідкокристалічного типу. Використання цих змін є більш кращим порівняно з іншими механооптичними ефектами (наприклад, розсіювання світла, спричинене потоком).

Важливо також, що такі зміни можуть бути кількісно описані в рамках простої лінійної моделі [12,14] принаймні для постійних і низьких частот потоків Пуазеля. Він надає шляхи оптимізації датчиків РК за допомогою чисельних розрахунків.

Відповідно до зауважень, викладених вище, можна зробити висновок, що будь-яка конструкція високочутливого датчика РК повинна включати комірки LC з початково гомеотропним шаром нематичного рідкого кристала, розміщеним між двома поляризаторами (див. рис.3.1b). Основна специфічна особливість функції передачі описуючи перетворення градієнта вхідного тиску G у вихідний електричний сигнал U від оптико-електричного перетворювача визначається немонотонною залежністю інтенсивності світла I від затримки фази, що викликається потоком:

$$I = I_0 \sin^2(\delta/2) \quad (3.1)$$

, де I_0 - інтенсивність вхідного світла

Останній параметр пропорційний градієнту тиску в квадраті при лінійному режимі руху директора в площині потоку [12,14,15]

$$\delta = A \cdot G^2 \quad (3.2)$$

У випадку постійного або квазістаціонарного (розпадного) потоку за відсутності полів параметр A легко виражається як [16]:

$$A = \frac{1}{15120} \cdot \frac{\pi \cdot h}{\lambda} \cdot \frac{n_o(n_e^2 - n_o^2)}{2n_e^2} \cdot \left(\frac{\alpha_2 h^3}{K_{33} \eta_1} \right)^2 \quad (3.3)$$

, де a_2 - коефіцієнт Леслі, η_1 - максимальна в'язкість зсуву, h - товщина шару, K_{33} - константа Франка n_e, n_o - звичайні та надзвичайні показники заломлення LC, λ - довжина світлової хвилі.

У загальному випадку коливального потоку частоти ω за наявності електричного поля параметр $A = A(\omega, \omega_0, \omega_E)$ залежить від трьох характерних частот ($\omega, \omega_0, \omega_E$) [12], де ω - частота застосовуваного градієнта тиску.

Характерні частоти руху директора за відсутності електричного поля (ω_0) та за наявності сильного електричного поля і можуть бути виражені як:

$$\omega_0 = \frac{K_{33}}{h^2 \gamma_1} \quad (3.4)$$

$$\omega_E = \frac{\epsilon_0 \Delta \epsilon E^2}{\gamma_1} \quad (3.5)$$

,де γ_1 ,, $\Delta \epsilon$, K_{33} - в'язкість обертання, анізотропія діелектричної проникності та константа Франка в LC.

Отже, градієнт тиску можна легко визначити, вимірюючи інтенсивність світла I при низьких значеннях затримки фази ($\delta < \pi$). Навпаки, таке визначення ускладнюється у випадку відносно високого значення затримки фази ($\delta > \pi$), оскільки різні значення градієнта тиску можуть відповідати однаковому значенню інтенсивності світла (рис.3.2).

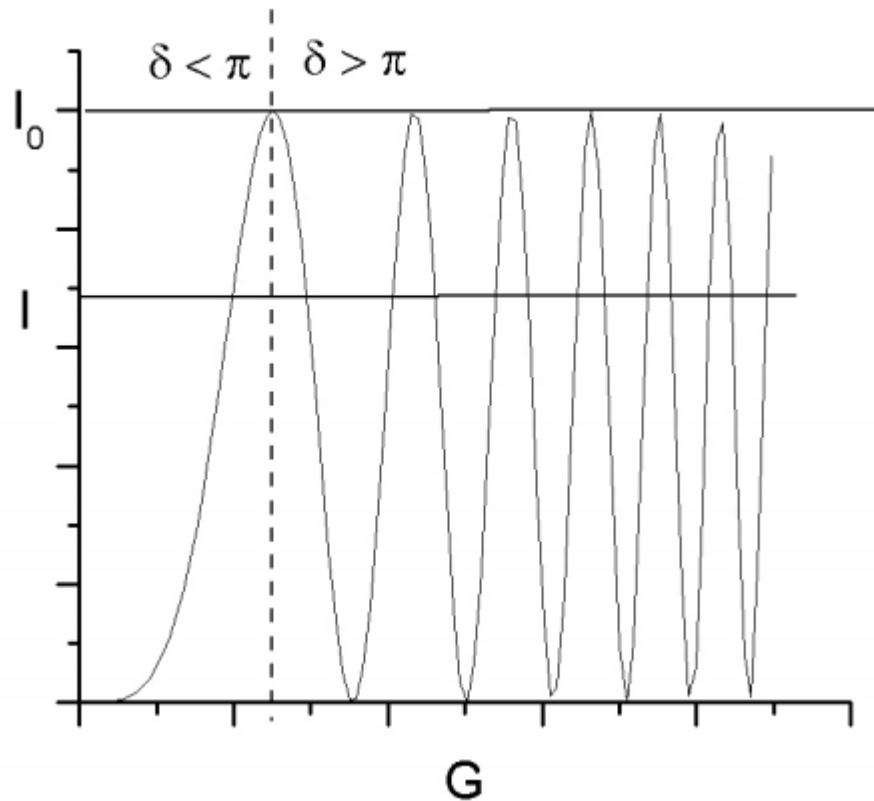


Рисунок 3.2 – Схема, що ілюструє принцип зворотного перетворення поляризованої інтенсивності світла I в градієнт тиску G для низьких ($< \pi$) та високих ($> \pi$) значень затримки оптичної фази δ

Отже, для двох згаданих вище випадків потрібні різні технічні рішення та алгоритми обробки оптичного сигналу.

а) $\delta < \pi$.

У найпростішому випадку достатньо розмістити LC-комірку постійного зазору з початковою гомеотропною орієнтацією між двома поляризаторами, орієнтованими на 45° відносно напрямку потоку, щоб досягти максимальної чутливості до градієнта тиску, що діє на рідкий кристал. Вимірювання потоку викликали зміни монохроматичної інтенсивності світла:

$$\Delta I = I - I_h \quad (3.6)$$

необхідний для отримання інформації про градієнт тиску. Параметр I_h у виразі (3.6), що відповідає темному стану системи, виникає внаслідок відхилення реа-

льних оптичних характеристик світлового пучка, поліризаторів та орієнтації шару від ідеальних ($I_d = 0$). Наприклад, теплові коливання директора в товстих шарах можуть бути причиною розсіювання світла та середнього відхилення режисера від одноосної кристалічної структури.

Враховуючи згаданий вище зв'язок між інтенсивністю світла I та затримкою фази δ (1), можна отримати наступне загальне вираз для зворотного перетворення $G = G(I)$:

$$G = \sqrt{\left[\frac{2}{A} \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}} \right]} \quad (3.7)$$

На практиці інтенсивність світла, зареєстрована фотоприймачем (фотодіодом, наприклад), зменшується за рахунок поглинання світла в поляризаторах та відбиття світла від ряду меж з різними показниками заломлення. Для виключення цих факторів співвідношення I / I_0 слід визначати шляхом вимірювання інтенсивності вихідного світла в перехресних (I) та паралельних (I_0) поляризаторах.

Гідродинамічна теорія забезпечує розрахунок нижньої (G_{\min}) і верхньої (G_{\max}) меж динамічного діапазону датчика LC, як функції ряду параметрів (товщина шару LC, напруженість електричного поля, частота коливань тощо). На противагу випадку дестабілізуючої дії електричного поля (перехід Фредерікса в гомеотропному шарі РК з від'ємним знаком $\Delta\epsilon$) не існує фізичного порогу для градієнта тиску, який індукує спотворення гомеотропного шару. Отже мінімальне значення градієнта тиску G_{\min} визначається здебільшого технічними параметрами джерел світла та приймачів. Значення I / I_0 має бути невеликим, але розумним для оцінки G_{\min} . У поданих нижче розрахунках ми будемо використовувати значення цього відношення, що дорівнює 10^{-2} .

Верхня межа G_{\max} , що відповідає першому максимуму на коливальній кривій (рис. 3.2), визначається умовою $I = I_0$. Отже, вирази для параметрів G_{\min} та G_{\max} можна записати так:

$$G_{\min} = \sqrt{\left[\frac{0.2}{A} \right]}$$

$$G_{\max} = \sqrt{\left[\frac{\pi}{A} \right]} \quad (3.8)$$

$$(3.9)$$

Варто зауважити, що визначене таким чином співвідношення G_{\max} / G_{\min} не залежить від значення параметра A і дорівнює приблизно 4. Це значення відповідає досить вузькому динамічному діапазону датчика РК, що реалізує найпростіше технічне рішення та алгоритм обробки сигналу. Це обмежує використання такого типу датчиків у випадках, коли чутливість високого порогу важливіша, ніж динамічний діапазон. Нижче ми розглянемо способи оптимізації цього важливого параметра.

b) $\delta > \pi$.

Одним із можливих способів збільшення динамічного діапазону датчиків РК є використання вимірювань в області немонотонної залежності інтенсивності світла від затримки фази і так на застосованому градієнті тиску. Дійсно, загальна кількість N_t максимумів інтерференції, що виникають при повній переорієнтації шару з гомеотропного стану в планарний, описується виразом:

$$N_t = (d\Delta n / \lambda) \quad (3.10)$$

Для відносно товстих шарів РК ($h = 100..200$ мкм) і типового значення показників заломлення анізотропії $\Delta n = n_e - n_o \sim 0.2$ параметр N_t буде змінюватися в діапазоні 30... 60 при $\lambda = 0,63$ мкм (червоне світло). Отже, динамічний діапазон у випадку (b) може бути розширений приблизно в 5-7 разів порівняно з досить вузьким діапазоном, реалізованим у випадку (a). Хоча така можливість здається привабливою, її практична реалізація не така проста, як у випадку (a). По-перше, треба знайти способи ідентифікації числа максимуму, що відповідає поточному стану шару. Використання комірки змінної щілини (наприклад, описа-

ної в [16,17]) разом з деякими оптичними каналами може розглядатися як можливе рішення такої проблеми. У цьому випадку також знадобиться складніший алгоритм обробки даних.

По-друге, існує ряд гідродинамічних нестабільностей, що виникають у гомеотропному шарі при відповідних порогових градієнтах [9,10,13]. Зокрема, перша гомогенна нестабільність пов'язана з втечею директора з площини потоку. Динаміка такої нестабільності є більш складною і повільною порівняно з простою лінійною динамікою, що спостерігається за режиму руху в площині потоку. При подальшому збільшенні градієнтів тиску відбуваються надзвичайно повільні ефекти квазі-пам'яті. Такі явища є досить небажаними з точки зору застосування сенсорів. Для постійних та інфрачервоних потоків частоти ситуація може бути частково покращена за рахунок застосування стабілізуючого електричного поля. На практиці випадок (b) може бути реалізований по-перше для градієнта тиску, який змінюється з чітко визначеною низькою частотою.

3.2 ШЛЯХИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДАТЧИКІВ РІДКОКРИСТАЛІЧНОГО ГРАДІЄНТА ТИСКУ

Проблему оптимізації датчиків РК можна вирішити різними способами. Зокрема, це може бути здійснено за допомогою комірок змінної щільності, оскільки низькочастотна оптична реакція гомеотропного шару сильно залежить від цього параметра ($\delta \sim h^7$ за відсутності полів [16-18]). Істотне підвищення чутливості датчика може бути досягнуто косою падінням світла на шар РК [19]. Нарешті, використання стабілізуючих електричних полів є дуже привабливим для поточного управління режимами та технічними характеристиками датчиків. Комбінація двох згаданих вище способів (осередки змінної щільності та стабілізуючих електричних полів) також можлива для застосування [16,17].

Теоретичний аналіз, проведений в рамках лінійної гідродинамічної моделі [12,14,15,18], показав, що застосування електричного поля на шарі РК при $\Delta\epsilon > 0$ призводить до двох основних наслідків. По-перше, це зменшує амплітуду режисерського спотворення, викликане градієнтом тиску. По-друге, він ефективно пригнічує зсув фаз між орієнтацією та коливанням тиску, тому може бути реалізований квазістаціонарний режим руху.

Можна використовувати нерівність:

$$m\omega \ll \omega_E, \quad m = 1 - \frac{(-\alpha_2)}{\eta_2} \frac{1}{1 - \alpha_3 / \alpha_2} \quad (3.11)$$

Можна використовувати нерівність (3.11) для оцінки електричної напруги, необхідної для реалізації квазістаціонарного режиму при заданій частоті коливань ω . Залежність частоти ω_E від електричної напруги U , виконана для параметрів

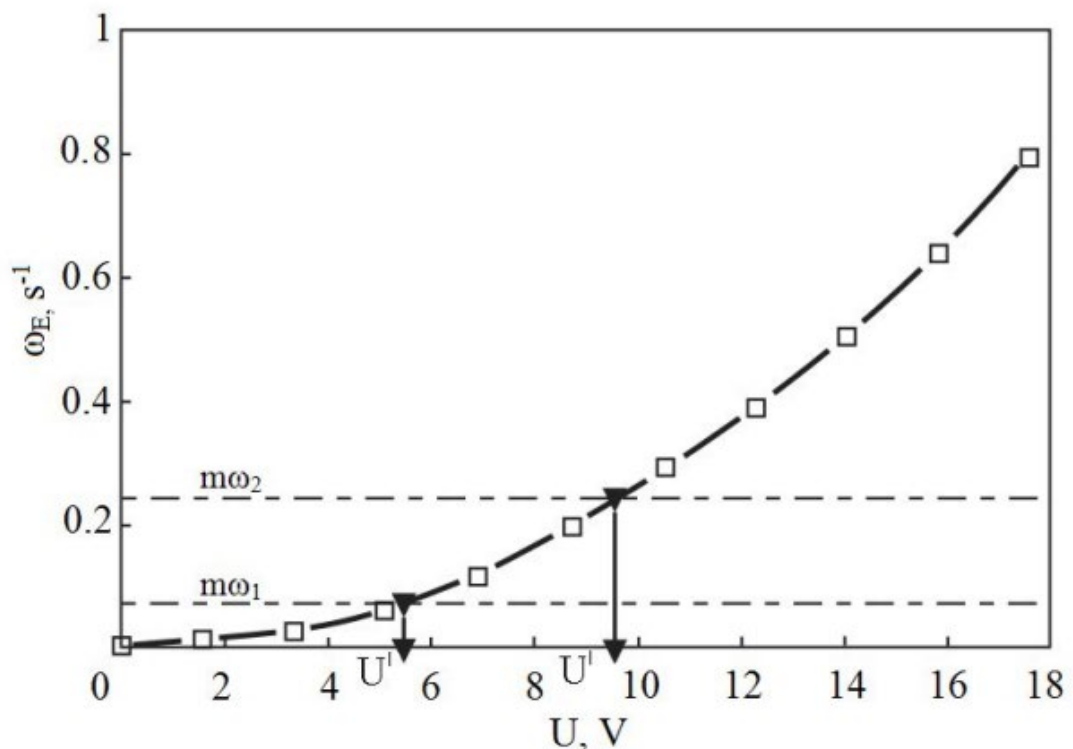


Рисунок 3.3 – Залежність частоти ω_E від електричної напруги U . Гранична напруга U' квазістаціонарного режиму визначається перетином цієї залежності та прямою лінією, що відповідає заданому значенню $m\omega$.

РК 654, ($f_1 = 0,02$ Гц, $f_2 = 0,286$ Гц)

нематичної суміші ЖК 654 і товщини шару $h = 105$ мкм, представлена на рис. 3.3. Квazистаціонарний режим буде досягнутий при $U \gg U'$. Гранична напруга U' зростає з частотою коливань.

Наявність квazистаціонарного режиму режисерського руху відіграє істотну роль у застосуванні комірок LC для визначення миттєвих значень часових градієнтів тиску $G(t)$ за допомогою обробки динамічного оптичного відгуку $I(t)$ у рамках простих рівнянь типу.

Експериментально таку можливість підтвердили результати досліджень механіко-оптичних ефектів у шарі ЖК-654, стабілізованому електричним полем [12,18]. Існування простої залежності $\delta(t) \sim \Delta P^2(t)$ дозволяє виконати зворотне перетворення $\Delta G(t) = \Delta P(t)/L = F[\delta(t)]$. Таке перетворення не залежить від частоти в діапазоні, що відповідає квazистаціонарному режиму.

При зриві квazистаціонарного режиму відновлення градієнта миттєвого тиску можливе шляхом експериментальної калібрування комірки на різних частотах і полях. Результати такої калібрування, що забезпечують визначення динамічного діапазону градієнта тиску, який був витягнутий із зазначених вище експериментів, представлені в таблиці 3.1.

Видно, що стабілізація електричного поля дає змогу збільшити відношення G_{\max} / G_{\min} до значень більше 50, що відповідає досить широкому динамічному діапазону. Додаткове використання стабілізуючого електричного поля також може істотно покращити інерційні властивості комірки РК (навіть в області відносно високих значень локальної товщини). Крім того, це корисно для придушення гідродинамічних нестабільностей, які можуть мати місце в досліджуваній геометрії [10,13]. Додаткове зміна товщини шару, здається, є найкращим варіантом для розробки датчиків РК надзвичайно широкого динамічного діапазону (G_{\max} / G_{\min} - близько 1000).

Таблиця 3.1. Межі G_{\min} і G_{\max} динамічного діапазону градієнтів тиску на різних частотах і напругах, обчислені відповідно до рівнянь. Дані отримують шляхом експериментальної калібрування позбавленої комірки, заповненої ZKK 654

	f=0.286 Hz		f=0.092 Hz	
U, (V)	G_{\min} , Pa/m	G_{\max} , Pa/m	G_{\min} , Pa/m	G_{\max} , Pa/m
1.6	101.9	404.0	52.52	208.2
3.4	130.5	517.1	93.13	369.1
5.2	173.8	688.6	144.6	573.2
6.9	234.9	930.9	218.5	866.1
8.7	321.3	1273	326.6	1294
10.5	478.1	1895	496.0	1966
12.3	586.7	2325	603.0	2390
14	816.5	3236	675.7	2678
15.7	969.0	3841	894.4	3545
17.6	1236	4897	1155	4577

3.3 РІДКІ КРИСТАЛЬНІ СЕНЗОРИ АКСЕЛЕРАЦІЇ, ВІБРАЦІЙ І ВКЛЮЧЕННЯ

Оптична реакція рідких кристалів на застосований градієнт тиску та її залежність від описаного вище електричного поля можуть використовуватися в електричних датчиках РК різного типу. Раніше ми детально розглядали фізичні передумови та можливе застосування датчиків диференціального тиску РК, коли градієнт тиску виникає через застосовану різницю тиску [17,20-23]. Нижче ми розглянемо основні принципи роботи та можливі конструкції інших датчиків на основі потоків рідких кристалів. Також будуть представлені оцінки деяких важливих характеристик датчиків.

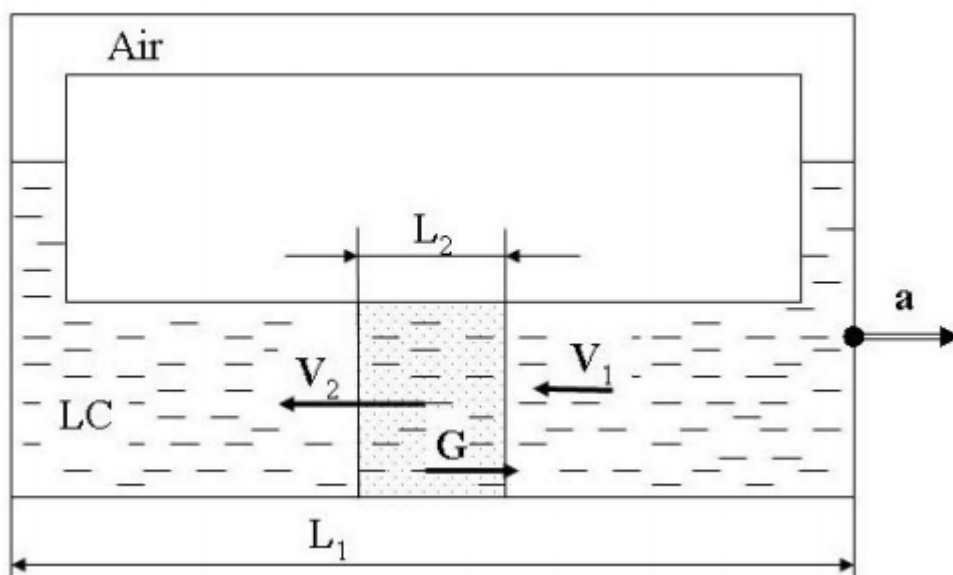


Рисунок 3.4 – Лінійний датчик прискорення: принцип роботи та конструкція

Градiєнтний тиск може бути вироблений не тільки різницею тиску, але і прискореним механічним рухом LC комірки за рахунок інерційних сил. Принцип роботи та можлива побудова датчика лінійного прискорення показані на рис. 3.4. Головною особливістю конструкції датчика порівняно з найпростішими датчиками градієнта тиску, розглянутими вище, є наявність двох каналів (1 і 2) різної довжини (L_1 і L_2) і зазору (h_1 і h_2). Це робиться для підвищення чутливості датчика до лінійного прискорення a , яке індукує потік LC в каналах за раху-

нок інерційних сил. Відомо, що гідродинамічний опір R каналу пропорційний $h^3 L$. Отже, при правильному виборі h_1 і h_2 опір першого каналу R_1 може бути істотно меншим, ніж у другого каналу R_2 , навіть у випадку $L_2 \ll L_1$, показаному на рис. 3.4. У цьому випадку градієнт тиску G що виникають в каналі 2 внаслідок сил інерції виражається як:

$$G = a \cdot \rho \cdot \frac{L_1}{L_2} \quad (3.12)$$

, де a - прискорення, ρ - LC щільність.

Мінімальне значення аміна прискорення, зареєстроване датчиком, визначається низькою межею G_{\min} градієнта тиску. Оцінки, зроблені відповідно до (3.12), дають $a_{\min} \approx 10^{-4} \text{ м/с}^2 \approx 10^{-5} \text{ г}$. для $G_{\min} = 1 \text{ Па/м}$ та $L_1/L_2 = 10$. Це набагато краще, ніж для більшості акселерометрів, що працюють в інфразвуковому діапазоні частот. Наприклад, п'єзодатчик 626 AX*4 (PSB, США) масою 0,635 кг, що використовується для моніторингу будівель, забезпечує діапазон прискорень $\pm 0,5 \text{ г}$ на частотах 0,03... 500 Гц. Це відповідає низькій межі діапазону близько $5,10^{-3} \text{ г}$ при типовій точності 1%. Чутливість датчика лінійного прискорення залежить від лінійних розмірів (довжина L_1 дорівнює 3 см при $L_2 = 3 \text{ мм}$ у розглянутому прикладі). Звичайно, для оптимізації технічних характеристик датчика можна використовувати як електричне поле, так і канал 2 змінної щільності.

Ця ж конструкція застосовується і для реєстрації низькочастотних вібрацій. Амплітуда a_0 прискорення, що утворюється періодичними коливаннями, пов'язана з амплітудою переміщення X_0 ($a_0 = X_0 \omega^2$). Мінімальне значення зареєстрованої амплітуди коливань можна оцінити як 100 мкм при частоті $f = 0,15 \text{ Гц}$ ($\omega \approx 1$) та параметрах згаданого вище каналу. Це значення по суті залежить від частоти і може бути зменшено шляхом збільшення відношення L_1/L_2 .

Технічне рішення, проілюстроване на рис.3.4, також передбачає розробку високочутливих датчиків нахилу з електричним керуванням відносно невеликих розмірів. У разі малих кутів нахилу φ градієнт тиску G виражається як:

$$G = g\rho \frac{L_1}{L_2} \varphi$$

(3.13)

Оцінки, зроблені відповідно до (3.13), показують надзвичайно високу чутливість таких датчиків до нахилу (мінімальний зареєстрований кут порядку 2 " при $G_{\min}=1$ Па/м і $L_1/L_2=10$). Він по суті вище типового значення інклонометрів промислового виробництва порівнянних розмірів (див., Наприклад, датчики нахилу ZEROTRONIC). Типова оптична характеристика інклонометрів ЖК та залежності кута нахилу від затримки оптичної фази представлені на рис.3.5 та 3.6.

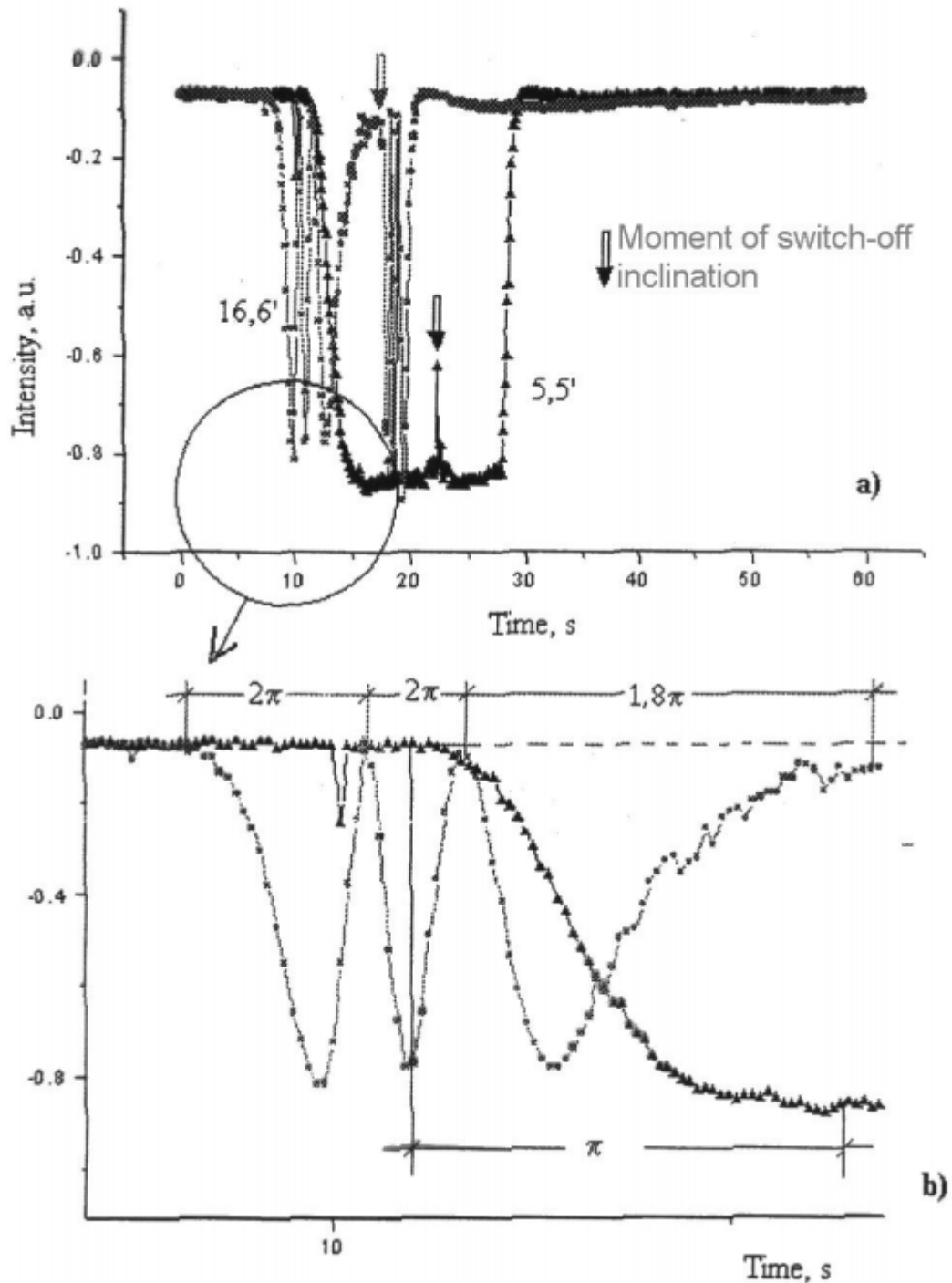


Рисунок 3.5 – Динамічна відповідь $I(t)$ датчика нахилу на різке збільшення кута нахилу φ (до значень $5,5'$ і $16,6'$) та майбутнє різке зменшення φ до нуля; дані були отримані за відсутності електричного поля

Представлені залежності підтверджують досить високу чутливість інклінометра РК. У той же час динамічний діапазон зареєстрованих кутів нахилу досить вузький, і при збільшенні φ виникає ряд максимумів перешкод. Отже, викорис-

тання стабілізуючого електричного поля видається дуже корисним. Зокрема, це

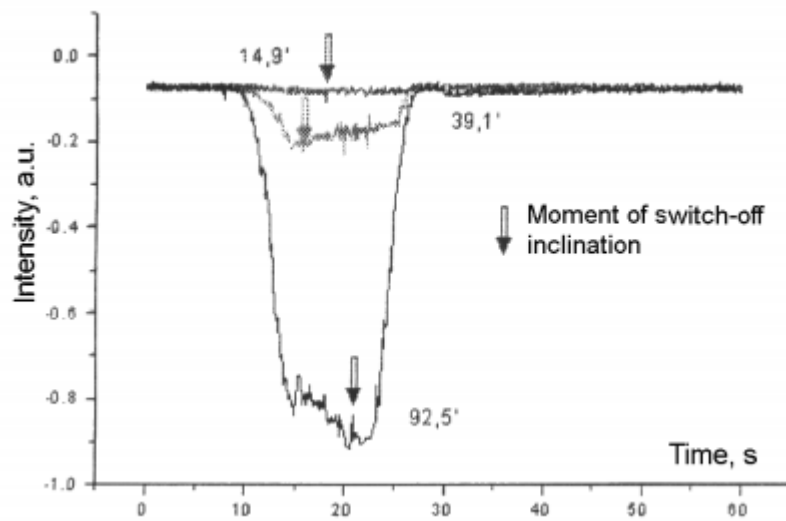


Рисунок 3.6 – $I(t)$ залежності, отримані при наявності стабілізуючого електричного поля ($U = 10$ В)

дозволяє забезпечити просту форму залежності $I(t)$, як показано на рис. 3.6

Калібрувальні криві для зворотних залежностей $\varphi(\delta)$, отриманих при обробці оптичної відповіді у відсутність та наявності електричного поля, показані на рис. 3.7а та 3.7б.

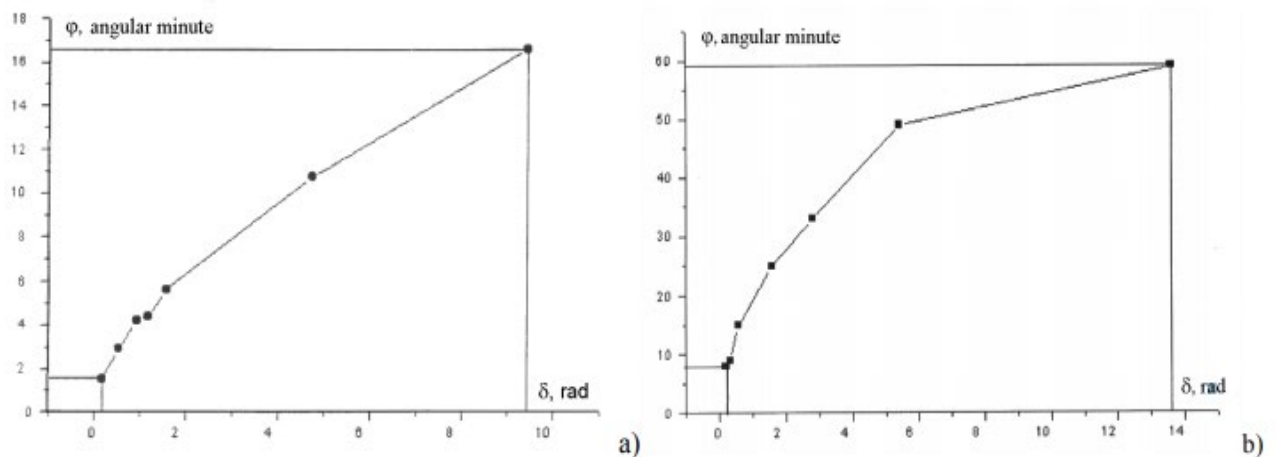


Рисунок 3.7 – Калібрувальна крива $\varphi(\delta)$ для датчика нахилу LC за відсутності електричного поля (а) та за наявності низької електричної напруги (б) ($U = 5$ В)

ВИСНОВОК

Основні представлені результати ми можемо узагальнити так:

1. Надзвичайно висока чутливість нематичних шарів до дії стійких і низькочастотних потоків, викликаних градієнтом тиску, є дуже привабливою для датчиків.
2. Лінійні деформації початкової гомеотропної орієнтації в потоках, виявлених через поляризуюче світло, можна розглядати як основний механооптичний ефект, що забезпечує найвищу порогову чутливість датчиків.
3. Використання стабілізуючих електричних полів є дуже ефективним для оптимізації технічних характеристик (порогова чутливість, динамічний діапазон та час роботи) датчиків РК.
4. Зміна товщини нематичного шару в поєднанні з електричними полями та використання ряду оптичних каналів дозволяють запропонувати рідкокристалічні датчики градієнта тиску, що характеризуються високою пороговою чутливістю та широким динамічним діапазоном.
5. На базі датчиків градієнта тиску можна запропонувати ряд конкретних рідкокристалічних датчиків (датчики диференціального тиску, датчики прискорення, вібрації, нахили, потоки рідини та газу).
6. Основними перевагами таких датчиків у порівнянні з аналогічними є висока чутливість і можливість електричного управління характеристиками.
7. Датчики рідкокристалічного типу на основі явищ потоку найбільш ефективні для реєстрації стійких або низькочастотних механічних збурень.

ПОСИЛАННЯ

- [1] Fraden, J. Handbook of Modern Sensor: Physics, Designs and Applications, Springer / J. Fraden, - New York 2004. – 26-48 p. – ISBN 978-0-387-21604-1
- [2] Webster, J. G. Mechanical variables measurement: Solid, Fluid, and Thermal CRC, Press LLC, Boca Raton./ Webster, J. G. – 2000. – 124 p. – ISBN 0849300479
- [3] Udd, E., Fiber Optic Sensors. An Introduction for Engineers and Scientists / Udd, E. – Wiley & Sons, Inc. – 2006. – 303-353 p. – ISBN: 978-0-470-12684-4
- [4] Dubois-Violette, E., "Pattern Formation in Liquid Crystals" / Dubois-Violette, E. and Manneville P. – 1996. – 56-112 p. – ISBN 0387946047
- [5] De Gennes, P.-G., The Physics of Liquid Crystals, Clarendon,/ De Gennes, P.-G. Prost, J., Oxford. – 1993. – ISBN 0198520247, 9780198520245
- [6] Chigrinov, V.G., Liquid Crystal Devices: Physics and Applications, Artech-House/ Chigrinov, V.G. – 1999. – 26-89 p. – ISBN-13: 978-0890068984 ISBN-10: 0890068984
- [7] Stewart, I.W., The static and dynamic continuum theory of liquid crystals; a mathematical introduction, Tailor and Francis/ Stewart, I.W. – 2004. – ISBN-13: 978-0748408962 ISBN-10: 0748408967
- [8] Kozhevnikov, E.N., Domain structure in a normally oriented liquid crystal layer under action of low-frequency shear/ Kozhevnikov, E.N. –1986. – ISBN- ?
- [9] Krekhov, A.P. Flow-alignment instability and slow director oscillations in nematic liquid crystals under oscillatory flow./ Krekhov, A.P. Kramer, L., – 1996. – ISBN- ?
- [10] Tarasov, O.S., Nematic liquid crystal under plane oscillatory flows, Mol. Cryst. Liq. Cryst., / Tarasov, O.S., Krekhov, A.P., Kramer, L., 328 p., 573 p. – 1999. – ISBN-?
- [11] Börzsönyi, T. Response of a homeotropic nematic liquid crystal to rectilinear oscillatory shear. / Börzsönyi, T. ; Buka ; Krekhov, A. P. ; Kramer, L. In: Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics. – Vol. 58, No. 6. pp. 7419-7427 – DOI: 10.1103

- [12] Pasechnik, S.V., Nonlinear Optical Response of Nematic Liquid Crystal on Varying Pressure Difference in the Presence of Electric Field / Pasechnik, S.V., Torchinskaya, A.V., Shustrov, B.A., Urmanova, T.N., *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*: 2001. – 367 p., 727 p. – DOI: 10.1080/10587250108028694
- [13] Pasechnik, S.V., Orientational Instability in a Nematic Liquid Crystal in a Decaying Poiseuille Flow / Pasechnik, S.V., Krekhov, A.P., Shmeleva, D.V., Nasibullaev, I.Sh., and Tsvetkov: 2005. – 100 p., 804p. – DOI: 10.1134/1.1926441
- [14] Pasechnik, S.V., Oscillating Poiseuille flow in photo-aligned liquid crystal cells / Pasechnik, S.V., Nasibullayev, I.Sh., Shmeliova, D.V., Tsvetkov, V.A., Chigrinov, V.G. *Liq. Cryst.*: 2006. – 33 p., 1153p. – DOI: 10.1080/02678290600965457
- [15] S.V. Pasechnik, Behaviour of nematic layer oriented by electric field and pressure gradient in the striped liquid crystal cell / S.V. Pasechnik, A.V. Torchinskaya. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*: 1999. – 331p., 341p. – DOI: 10.1122/1.1603239
- [16] Pasechnik, S. V., Anisotropic shear viscosity in nematic liquid crystals: new optical measurement method / Pasechnik, S. V., Chigrinov, V. G., Shmeliova, D. V., Tsvetkov, V. A., Voronov, A. N., *Liq. Cryst.*: 2004. – 31 p., 585 p. – DOI: 10.1080/02678290410001667371
- [17] Shmeliova D.V., The application of liquid crystal cells of variable thickness in electrically controlled sensors of low-frequency vibrations / Shmeliova, D.V., Pasechnik, S.V., et.al., – 457 p. – 2002. – DOI: 10.1080/15421400490433983
- [18] Pasechnik S.V., Orientational oscillations in homeotropic layers of liquid crystals induced by low frequency pressure gradient in the presence of stabilizing and destabilizing electric field / Pasechnik, S.V., Shmeliova, D.V., et.al., *Mol.Cryst.Liq.Cryst*: 2004. – 409, 449 – DOI: 10.1080/02678290410001667371
- [19] V.A Balandin., Increase of the sensitivity of a liquid-crystal cell to low-frequency pressure vibrations \ V.A Balandin., E.V Gevorkyan., S.V. Pasechnik, *Tech. Phys.Lett.*: 1993. – 19 p., 154 p. – DOI: 10.1080/15421400490433983
- [20] Pasechnik, S.V., Prospects for the application of liquid-crystal cells for the registration and visualization of mechanical oscillations in biomedical technologies. *J. of SID* / Pasechnik, S.V., Kravchuk, A.S. et.al., 2003. – 11 p., 15 p. – DOI:

10.1889/1.1831699

[21] Orlov, V.A., Pressure difference meter / Orlov, V.A., Balandin, V.A., Pasechnik, S.V., Zotkin, S.P., Solovjev, A.E., Vasiljev, I.N., Patent of Russia SU1719944 (A1): 1992. – DOI: ?

[22] Balandin, V.A., Transducer of vortex flowmeter / Patent of Russia, RU2071035 (C1): 1996. – DOI: ?

[23] J.W. Gardner, Microsensors principles and applications / J.W. Gardner, Wiley, New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: 1994. – ISBN 0-471-94135-2/94136-0.

[24] S. Iqbal, Measurement accuracy of lateral-effect positionsensitive devices in presence of stray illumination noise / S. Iqbal, M.M.S. Gualini, A. Asundi, Sens. Actuators A: 2008. – 143 p. 286-292 p. – DOI: 10.1016/j.sna.2007.11.015

[25] Paul Regtien, Sensors for Mechatronics / Paul Regtien, Edwin Dertien, 2018. – ISBN-13: 978-0128138106 ISBN-10: 0128138106

[26] Guide to the expression of uncertainty in measurement; International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995. – ISBN 92-67-10188-9.

[27] ISA S37.1: Electrical transducer nomenclature and terminology, 1975. – ISBN 0-87664-113-3

[28] Various documents of the ISA working groups, for instance: ISA-S37.2, Specification and tests for piezoelectric acceleration transducers. ISA-S37.3, Specification and tests for strain gage pressure transducers, 1982. – ISBN 0-87664-378-0

ISA-S37.5, Specification and tests for strain gage linear acceleration transducers. ISA-S37.6, Specification and tests for potentiometric pressure transducers, 1982. – ISBN 0-87664-380-2

ISA-S37.12, Specification and tests for strain gage force transducers.
 ISA-S37.10, Specification and tests for piezoelectric pressure transducers, 1982. – ISBN 0-87664-382-9

ISA-S37.12, Specification and tests for potentiometric displacement transducers, 1977. – ISBN 0-87664-359-4

[29] International Vocabulary of Metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM), Document produced by Working Group 2 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 2), JCGM 200: 2008.

[30] D.J.W. Noorlag, Lateral-photoeffect position-sensitive detectors, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1982.

[31] M. Tartagni, Progress in VLSI optical position-sensitive circuits / M. Tartagni, P. Perona, Sens. Actuators A: 1998. – 67 p., 109-114 p. – DOI: 10.1016/S0924-4247(97)01773-1

[32] E. Fortunato, New materials for large-area position-sensitive sensors / E. Fortunato, R. Martins, Sens. Actuators A: 1998. – 68 p. 244-248 p. – ISSN: 0924-4247

[33] T. Fujita, A new type of position sensitive device and its detecting characteristics / T. Fujita, M. Idesawa, ISMCR'99, Tokyo, Japan: 10-11 June 1999, in: Proc. IMEKO-XV World Congress, Osaka, Japan, 13-18 June 1999, Vol. X, pp. 1-6. PMID: 17405385 DOI: 10.1109/TBME.2006.889201

[34] D. Qian, A method for measurement of multiple light spot positions on one position-sensitive sensor (PSD) / D. Qian, W. Wang, I.J. Busch-Vishniac, A.B Buckman, IEEE Trans. Instrum. Meas.: 1993. – 14-18 p. – DOI: 10.1109/19.206672